



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

**Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la
deforestación por minería aurífera aluvial en la
Quebrada Guacamayo, utilizando el método de
segmentación por umbrales a partir de imágenes de
satélite**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Jason Einer ROJAS FLORES

ASESOR

Joel ROJAS ACUÑA

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Rojas, J. (2017). *Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la deforestación por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, utilizando el método de segmentación por umbrales a partir de imágenes de satélite*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL
TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 18:00 horas del viernes 13 de octubre de 2017 en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra (Presidente), Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe (Miembro), Dr. Joel Rojas Acuña (Asesor), Mg. César Omar Jiménez Tintaya (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M1, del Bachiller:

ROJAS FLORES, JASON EINER

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Rojas Flores, Jason Einer, a realizar una exposición de Trabajo de Tesis titulado: "Estimación de la variabilidad espacial y temporal de la deforestación por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, utilizando el método de segmentación por umbrales a partir de imágenes de satélite".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

MUY BUENO

(MENCIÓN)

18

(NÚMERO)

DICIENCHO

(LETRAS)

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Rojas Flores, Jason Einer. Siendo las 19:15 Horas, se levanta la Sesión.

Dr. Whualkuer Enrique Lozano Bartra
PRESIDENTE

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe
MIEMBRO

Dr. Joel Rojas Acuña
ASESOR

Mg. César Omar Jiménez Tintaya
SUPLENTE

A ti madre, Máxima Flores Olivares, por tu amor y constancia.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a las personas e instituciones que han contribuido a la realización del presente trabajo:

A mi madre primero que nadie, por la motivación y confianza depositada en mi, sin ella no habría sido posible este trabajo, una vez más lo logramos.

A mi asesor el Dr. Joel Rojas Acuña, por su asesoramiento en este trabajo de tesis.

Al Mg. Rolando Badaracco Meza por guiarme todo este tiempo en el desarrollo de mi trabajo de tesis.

Agradezco al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) por la disponibilidad de las imágenes TM, ETM+, OLI y MODIS. También a la organización sin fines de lucro, World Wildlife Fund (WWF), por permitirme realizar la práctica pre-profesional en su oficina ubicada en la ciudad de Puerto Maldonado, departamento de Madre de Dios, contribuyendo de esta manera a mi desarrollo integral en temas de medio ambiente y deforestación por minería aurífera aluvial.

RESUMEN

El presente trabajo muestra la utilidad de las imágenes de satélite y su importancia en la detección y estimación de la cuantificación de áreas deforestadas a causa de la minería aurífera aluvial. El área de estudio es la Quebrada Guacamayo ubicada en la región Madre de Dios, Perú. En la investigación se utilizaron imágenes de satélite registradas por los sensores TM, ETM+ y OLI (resolución espacial de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$) a bordo de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8, respectivamente. Estas imágenes fueron procesadas mediante el software de procesamiento de imágenes ENVI v5.2, obteniendo la reflectancia de la superficie del suelo. Posteriormente se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) el cual fue utilizado para determinar los umbrales mediante la técnica de segmentación por umbrales. Esta técnica se basa en la conglomeración de píxeles de un determinado tipo de superficie que a su vez permite delimitar las áreas deforestadas por minería aurífera de suelos desnudos de escasa vegetación, vegetación natural, áreas de cultivo y cuerpos de agua. De acuerdo al análisis de la segmentación aplicado a las imágenes, se determinó que el umbral superior fue de 0.52, mientras que el umbral inferior fue de -0.28. Los resultados obtenidos muestran que la deforestación por minería aurífera en la Quebrada Guacamayo, comenzó a desarrollarse entre los años 2006 y 2007. Se determinó que la tasa promedio anual durante el periodo de estudio (2006 – 2015) fue de 1,260 ha/año. El mayor incremento anual de la deforestación por esta actividad, se dio entre los años 2010 – 2011, a raíz de un incremento del precio del oro para este periodo, con un área estimada de 1746.45 ha. Finalmente el análisis estadístico muestra que los datos del

precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería aurífera, presenta una alta relación lineal entre ambas variables, con un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0.95$.

Palabras claves: Deforestación, minería aurífera, imágenes de satélite.

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABLAS	xi
ACRÓNIMOS.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Objetivos de la tesis	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Hipótesis de la Tesis	5
1.4. Antecedentes	5
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO	8
2.1. Elementos físicos de un proceso de teledetección	9
2.2. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera	10
2.2.1. Absorción	11
2.2.2. Scattering (Dispersión)	13
2.3. Corrección Atmosférica	14
2.3.1. El modelo FLAASH	15
2.4. Reflectancia de las superficies terrestres	18
2.4.1. Factores que determinan la respuesta espectral típica de la vegetación	19
2.4.2. Respuesta espectral típica de un apilado de hojas	20
2.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	21
2.6. Series de tiempo	22
2.6.1. Enfoques para la generación de series de tiempo	23

2.6.1.1. Composición y apilado de la información	23
2.6.1.2. Filtrado	24
2.6.1.3. Datos auxiliares	24
2.6.2. Análisis estadístico de las series de tiempo	24
2.6.2.1. Análisis gráfico de una serie de tiempo	24
2.6.2.2. Componente de tendencia	25
2.7. Máximo y Mínimo Valor Compuesto (MVC)	25
2.8. Coeficiente de correlación de Pearson	27
CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS UTILIZADOS	28
3.1. Ubicación del área de estudio	29
3.2. Datos productos MODIS	31
3.3. Datos imágenes TM, ETM+ y OLI	31
3.4. Datos ASTER GDEM	33
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	34
4.1. Preprocesamiento de los datos imágenes de satélite	35
4.1.1. Calibración radiométrica de datos imágenes de satélite	35
4.1.1.1. Número digitales a radiancia espectral de las imágenes TM y ETM+	36
4.1.1.2. Número digitales a radiancia espectral de las imágenes OLI	38
4.1.1.3. Radiancia espectral a reflectancia TOA de las imágenes TM y ETM+	39
4.1.1.4. Radiancia espectral a reflectancia TOA de las imágenes OLI	40
4.1.2. Corrección atmosférica utilizando el modelo FLAASH	41
4.1.2.1. Parámetros que requiere el módulo FLAASH	42
4.2. Cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	44
4.3. Obtención del compuesto anual y del mínimo valor compuesto	45
4.4. Estimación de la superficie deforestada a partir de imágenes de satélite	46
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	47
5.1. Histograma de los productos NDVI – MODIS	48
5.2. Compuesto anual de los datos productos NDVI del sensor MODIS	49
5.3. Serie de tiempo del compuesto anual de datos productos NDVI/MODIS	50
5.4. Mínimo Compuesto de datos productos NDVI del sensor MODIS	53
5.5. Modelo de elevación digital (DEM) de la región de estudio	54

5.6. Combinación RGB de las bandas del sensor OLI	56
5.7. Comportamiento espectral de las superficies que componen el área de interés	57
5.8. Distribución espacial y temporal del NDVI de la Quebrada Guacamayo.....	58
5.9. Determinación del umbral para la segmentación de áreas mineras	59
5.10. Segmentación de áreas de minería, aplicando selección de umbrales	62
5.11. Cuantificación de áreas deforestadas por minería aurífera aluvial	63
5.12. Precio del oro y su relación con el incremento de la deforestación por minería aurífera a través del tiempo.....	65
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	67
6.1. Conclusiones	68
REFERENCIAS	70

ANEXOS

A.1. Términos y unidades de medida	
A.2. Reflectancia (ρ)	
A.3. Características radiativas de la materia	
B.1. Distancia Tierra-Sol	
C.1. Características técnicas de los satélites Terra y Landsat	
C.2. Características técnicas de los sensores TM, ETM+ y OLI	
C.3. Características generales del sensor Aster, aplicado a la generación de modelos digitales de elevación (DEM)	
D.1. Datos imágenes utilizados	
E.1. Precio mensual del oro (\$US/kg)	
F.1. Resultados obtenidos de la acumulación e incremento anual de las áreas deforestadas por minería aurífera aluvial.	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Precio del oro, deforestación por minería e importación del mercurio a través del tiempo	6
Figura 2.1.	Formas de Teledetección	9
Figura 2.2.	Espectro de absorción de la radiación en la atmósfera	12
Figura 2.3.	Firmas espectrales típicas de la vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo del espectro electromagnético	18
Figura 2.4.	Curva de reflectividad típica de la vegetación sana	19
Figura 2.5.	Modelo de la respuesta espectral de un apilado de dos hojas	21
Figura 2.6.	Máximo y mínimo valor compuesto de una serie de imágenes de fechas distintas.	26
Figura 3.1.	Ubicación de la Quebrada Guacamayo	30
Figura 4.1.	Ejemplo de cálculo, del compuesto anual y el mínimo valor compuesto	45
Figura 5.1.	Histogramas del compuesto anual de los productos NDVI	48
Figura 5.2.	Examinación visual de la dinámica de la cobertura vegetal en la Quebrada Guacamayo, a partir del compuesto anual de los datos productos NDVI MODIS/TERRA	49
Figura 5.3.	Selección de tres zonas para el análisis de serie de tiempo, a partir del compuesto anual del NDVI (año 2014)	50
Figura 5.4.	Serie de tiempo del NDVI (MODIS/TERRA), de las tres zonas de interés en la Quebrada Guacamayo	52
Figura 5.5.	Detección de áreas deforestadas a partir del cálculo del mínimo compuesto de 16 imágenes productos NDVI (MODIS/TERRA), correspondiente al periodo 2000 – 2015	53
Figura 5.6.	Modelo de elevación digital (DEM) del distrito de Inambari. Se muestra la elevación en metros con respecto al nivel del mar	54

- Figura 5.7.** Análisis de elevación del perfil horizontal de un sector de la región de interés 55
- Figura 5.8.** Combinación RGB: 754, de la imagen del sensor OLI / Landsat-8 (29-08-2015). En la imagen de la derecha se muestra la región de interés, donde se aprecia los diferentes tipos de superficies 56
- Figura 5.9.** Reflectancia de los principales tipos de superficie en la imagen, en función de la Longitud de Onda central. Imagen del sensor TM/ LANDSAT 5 (03/09/11) 57
- Figura 5.10.** Imágenes NDVI de la Quebrada Guacamayo obtenías a partir de los sensores TM, ETM+ y OLI (periodo 2007 – 2015) 58
- Figura 5.11.** Selección de tres zonas que contienen los principales tipos de superficies en la región de interés (Recuadros de color rojo). Imagen NDVI, OLI / Landsat-8 (29/08/2015) 59
- Figura 5.12.** Gráfico de dispersión del NDVI vs perfil horizontal de las tres zonas seleccionadas en la imagen NDVI (29-08-2015). Determinación del umbral superior e inferior de las áreas de minería aurífera aluvial 61
- Figura 5.13.** Segmentación de la minería aurífera aluvial en la quebrada Guacamayo (área de color rojo), para el periodo 2007 – 2015 62
- Figura 5.14.** Se muestra la acumulación anual de la deforestación en la Quebrada Guacamayo (Barras de color rojas). Incremento anual de las áreas deforestadas por minería (Barras de color amarillo) 63
- Figura 5.15.** Tendencia o regresión lineal de la deforestación anual acumulada por minería aurífera en la quebrada Guacamayo, periodo 2007 – 2015 64
- Figura 5.16.** Precio del oro y áreas deforestadas por minería aurífera a través del tiempo 65
- Figura 5.17.** Regresión lineal de los datos del precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería en la Quebrada Guacamayo, durante el periodo 2006 – 2015 66

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.	Datos imágenes adquiridas de los satélites Landsat	32
Tabla 3.2.	Datos DEM, adquiridos	33
Tabla 4.1.	Valores máximos y mínimos de radiancia del sensor TM	37
Tabla 4.2.	Valores máximos y mínimos de radiancia, en modo de baja y alta ganancia del sensor ETM+	38
Tabla 5.1.	Valores de NDVI de la zona 1, zona 2 y zona 3, periodo 2000 al 2015	51

ACRÓNIMOS

CPF	Calibration Parameter File
DEM	Digital Elevation Model
CONIDA	Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial
ENVI	Environment for Visualizing Images
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
EOS	Earth Observing System
ETM+	Enhanced Thematic Mapper
FASC	Full Aperture Solar Calibrator
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
GIFOV	Ground Instantaneous Field of View
GLOVIS	Global Visualization Viewer
IC	Internal Calibrator
IDL	Interactive Data Language
IFOV	Instantaneous field of view
LDO	Longitud de onda central
MISR	Multiangle Imaging Spectroradiometer
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Transmission
MSS	Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada

NIR	Infrarrojo muy cercano
NLAPS	National Landsat Archive Processing System
RCC	Radiometric Conversion Coefficients
REM	Radiación electromagnética
PASC	Partial Aperture Solar Calibrator
SLC	Scan Line Corrector
TM	Thematic Mapper
TERRA	Satélite multinacional de la NASA de investigación científica por satélite
TOA	Top of the Atmosphere
OLI	Operational Land Imager
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS84	World Geodetic System 84

Capítulo1:

Introducción

La minería aurífera aluvial es una actividad extractiva que se desarrolla en todos los países de la cuenca amazónica y que genera graves impactos ambientales en este ecosistema, además de impactos de carácter económico y social, configurando un escenario de vulneración de los derechos ambientales de poblaciones que dependen de manera directa de estos ecosistemas para su subsistencia (Heck, 2014). En una zona como Madre de Dios, uno de los departamentos menos poblados en el país, el descubrimiento de oro en los placeres y lechos de los ríos originó una masiva inmigración principalmente desde los departamentos más pobres del país, provocando la deforestación de bastas zonas de vegetación natural y la contaminación de los suelos y cursos de agua con mercurio (Kuramoto, 2001).

Esta investigación propone estimar las áreas deforestadas por minería aurífera aluvial, durante el periodo 2006 – 2015 a partir de imágenes de satélite. En este sentido, la Teledetección es una excelente herramienta que permite obtener información a distancia, a través de sensores, instrumentos susceptibles de detectar señal electromagnética que les llega de la tierra y la atmosfera para convertirla en una magnitud física que pueda ser tratada y grabada. Las imágenes de satélite ofrecen una cobertura global y periódica de la superficie terrestre con una visión panorámica y homogénea en la toma de datos (Karszenbaum, 2005).

Los datos que se utilizaron en este trabajo, fueron los índices de vegetación (NDVI) incluidos en los productos MOD13Q1 del sensor MODIS-Terra e imágenes multiespectrales registrados por los sensores TM, ETM+ y OLI (Landsat). La alta resolución temporal del sensor MODIS permite la generación de series de tiempo, debido a que es posible observar cualquier parte de la tierra diariamente (Colditz,

2007). La resolución espacial media de los sensores de los satélites Landsat, permite obtener una mejor estimación de la cuantificación de las áreas deforestadas por minería aurífera aluvial.

Con estos datos se pretende estimar la evolución espacial y temporal de áreas deforestadas a causa de la minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, ubicado en el distrito de Inambari en el departamento de Madre de Dios para el periodo 2006 al 2015. El área de estudio es de especial interés por haberse convertido en pocos años en la principal zona de actividad minera aurífera de mayor extensión en el departamento de Madre de Dios y por el impacto negativo al medioambiente y la sociedad.

1.1. Planteamiento del problema

El departamento de Madre de Dios posee un valor ecológico tan alto, que recibió la denominación de capital de la biodiversidad en el Perú (Moschella, 2011). Asimismo, es el departamento menos poblado del país, factor que, durante décadas, le ha permitido mantener su alto grado de diversidad biológica. Esta situación se ve confrontada con la creciente extracción minera. Se estima que Madre de Dios produce el 70% del oro de la minería artesanal e ilegal del país (Romero et al., 2005).

Dentro de la cuenca del río Inambari se ubica la Quebrada Guacamayo, la cual es una de las zonas de mayor actividad minera del departamento. La Quebrada Guacamayo se ubica en el distrito de Inambari, provincia de Tambopata,

departamento de Madre de Dios y posee un área de 6,678 ha. La extracción aurífera en esta región comenzó a desarrollarse a partir del año 2007 y debido al potencial de oro en la zona, la extracción minera se fue expandiendo por ambos márgenes de la quebrada, atravesando la carretera Interoceánica. (Swenson et al., 2011).

Los principales impactos ambientales por la actividad minera aurífera en la Quebrada Guacamayo son: la emisión de mercurio al aire y agua, la deforestación del bosque tropical amazónico, la degradación del suelo y la contaminación de los ríos por sedimentos (Moschella, 2011). Es así que se hace necesario recurrir a herramientas de teledetección con el objetivo de estimar y monitorear la pérdida de vegetación natural a consecuencia de la minera aurífera.

1.2. Objetivos de la tesis

1.2.1. Objetivo general

Estimar la variabilidad espacial de las áreas deforestadas por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, usando los datos de las imágenes registradas por los sensores TM, ETM+ y OLI, durante el periodo 2006 – 2015, mediante la aplicación del método de segmentación por umbrales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis temporal a partir de datos productos NDVI obtenidos del sensor MODIS a bordo del satélite Terra, durante el periodo 2000 – 2015.

- Estimar la cuantificación de las áreas deforestadas por minería aurífera en la Quebrada Guacamayo, aplicando el método de segmentación por umbrales, durante el periodo 2006 – 2015.
- Estimar la relación lineal entre el precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, mediante análisis estadísticos.

1.3. Hipótesis de la Tesis

Es posible detectar y estimar la pérdida de cobertura vegetal a consecuencia de la minería aurífera en la Quebrada Guacamayo, utilizando imágenes de satélites mediante la técnica de segmentación por umbrales.

1.4. Antecedentes

La pérdida de vegetación natural a consecuencia de la deforestación por minería aurífera aluvial en la región de Madre de Dios, ha sido estimada utilizando diversas técnicas de percepción remota, con el objetivo de calcular el área total deforestada con la mejor precisión posible. En este contexto, se tiene el estudio realizado por Swenson et al. (2011), en esta publicación se evidencia la relación entre el precio del oro y la importación de mercurio con el incremento de la minería aurífera y consecuentemente con la pérdida de áreas boscosas naturales (Figura 1.1). El cálculo de la deforestación fue estimada a partir de imágenes del sensor TM a bordo del satélite Landsat 5 (path 3, row 69) durante el periodo 2003 - 2009 y clasificadas utilizando el método de clasificación supervisada ISODATA. Las áreas de estudio

fueron la quebrada Guacamayo y la región de Colorado Puquiri, en el Departamento de Madre de Dios.

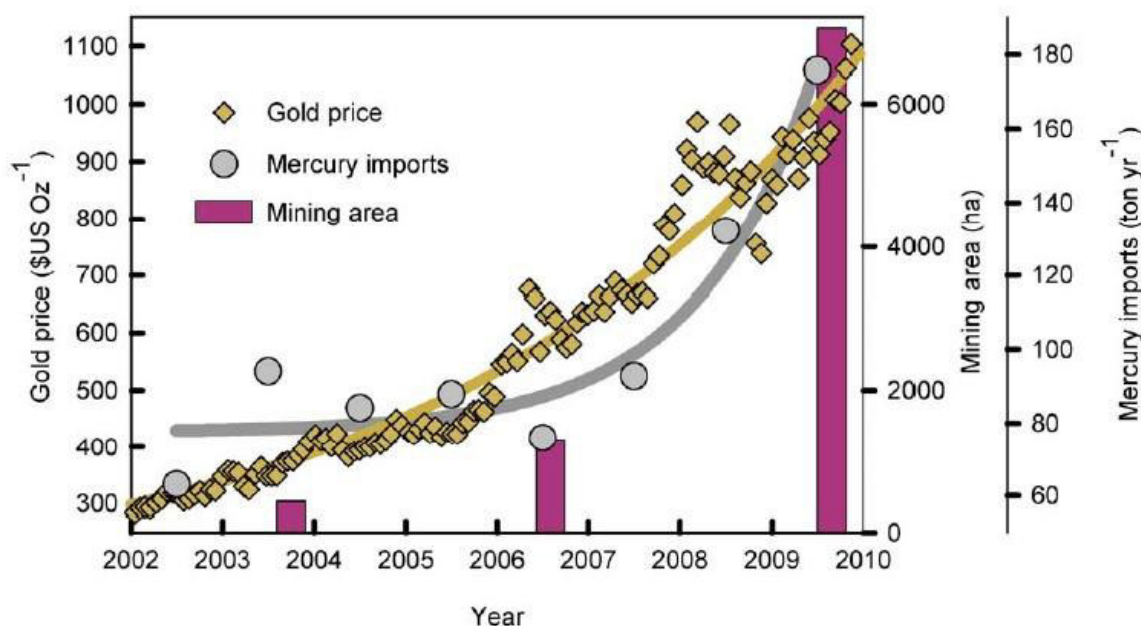


Figura 1.1. Precio del oro, deforestación por minería e importación del mercurio a través del tiempo (Swenson et al., 2011).

Por otro lado, desde finales del año 2009, a través del Convenio de Colaboración Interinstitucional entre el Ministerio del Ambiente (MINAM), el Instituto CARNEGIE para la Ciencia y los equipos técnicos de la Dirección General de Ordenamiento Territorial, desarrollaron actividades técnicas y de fortalecimiento de capacidades para contar con los fundamentos técnicos y metodológicos que sustenten el Monitoreo de la Cobertura de Bosques, Deforestación y Degradación Forestal (Llactayo et al., 2015). En el marco de esta colaboración se desarrolló una primera etapa de trabajo con el análisis para el periodo 2000-2005-2009, que represento un proceso de aprendizaje y adaptación. Esto comprendió el mejoramiento del sistema de análisis de imágenes y su adaptación a las condiciones de la Amazonía, el

desarrollo de protocolos de clasificación y validación, así como el empleo de las campañas de sobre vuelos del Observatorio Aéreo de Carnegie (CAO) que apoyó enormemente en la validación de los resultados (Asner et al., 2009). Una segunda etapa, comprendió la generación de información sobre la cuantificación de los cambios de la cobertura de bosque, deforestación y degradación de la Amazonía Peruana para el periodo 2009-2010-2011, que fue posible gracias a la aplicación de una herramienta de análisis más robusta y precisa como CLASlite 3.0 (Asner et al., 2009). Este software de base satelital desarrollado por Carnegie para el análisis de la cobertura, deforestación y degradación del bosque, el cual de manera continua y colaborativa ha sido desarrollado en conjunto con MINAM para su mejor adaptación a la realidad del Perú. Los resultados de los análisis de los periodos 2000-2005-2009-2010-2011 fueron publicados oficialmente en febrero del 2014 (Llactayo et al., 2015).

En cuanto al cálculo de la tasa de deforestación anual, Moreno R. (2013) de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial – CONIDA, en su publicación señala que es posible usar imágenes de baja resolución espacial para calcular el área deforestada, donde la exactitud depende de la calidad de los datos NDVI. Este estudio comprueba que el crecimiento de la deforestación en la provincia de Tambopata durante el periodo 2007 – 2011, presenta una tasa de deforestación anual de 970 ha, lo que demuestra un crecimiento acelerado de la deforestación (Moreno, 2013).

Capítulo 2:

Fundamento Teórico

2.1. Elementos físicos de un proceso de teledetección

El proceso de obtención de una imagen de la superficie terrestre, involucra la interacción entre la radiación electromagnética incidente y los objetos en superficie. Es así, que se presentan los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (a bordo de una plataforma satelital), objeto observado (parte de la superficie terrestre) y flujo energético (Sol u otra fuente de iluminación) que permite poner a ambos en relación. En el caso del sensor, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión – reflexión (Figura 2.1), (Chuvieco, 1995).

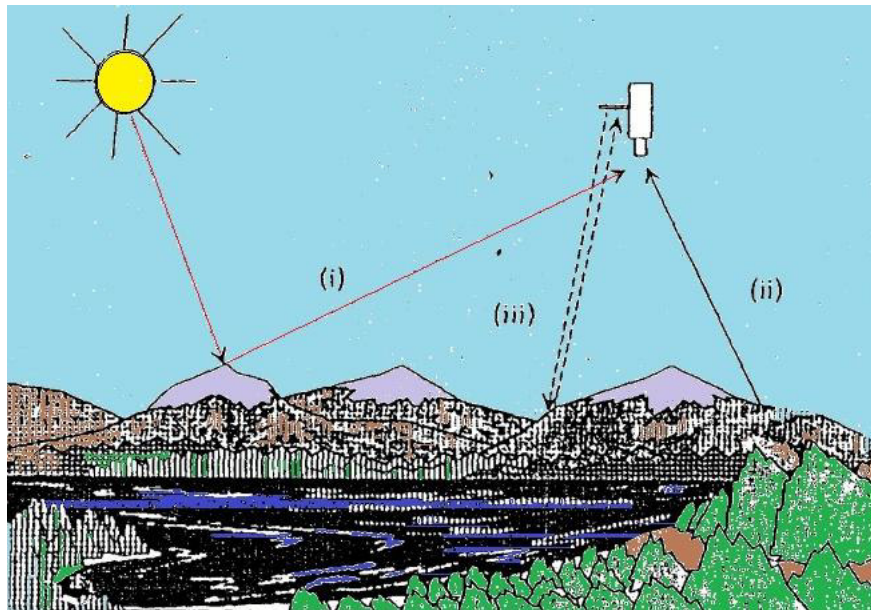


Figura 2.1. Formas de Teledetección.

En la Figura 2.1, el sector (i) es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía del planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, y refleja esta energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Este flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a la estación receptora. Entre superficie y sensor se interpone la atmosfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse también, en la energía emitida por las propias cubiertas (ii), o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre (iii). En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética (Chuvieco, 1995).

2.2. Interacción de la radiación electromagnética con la atmósfera

Hasta este punto, se ha considerado la interacción de la radiación electromagnética con las diversas coberturas terrestres prácticamente como si este proceso se desarrollara en el vacío. Obviamente, esta suposición es falsa, puesto que entre el sensor y la superficie terrestre se interpone la atmósfera, que interfiere de formas diversas con el flujo radiante (Chuvieco, 1995).

La atmósfera de la Tierra no se encuentra en equilibrio termodinámico debido a que la temperatura, y por tanto el campo de radiación, varía de unos puntos a otros. De este modo, una parcela de aire intercambia energía con sus alrededores a temperaturas distintas. (Lenoble, 1993).

La atmósfera se compone de gases; CO₂, O₂, ozono, N₂, argón, vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. Su efecto es triple: (i) absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda, y (iii) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico. Estos procesos introducen modificaciones en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor (Chuvieco, 1995).

2.2.1. Absorción

La absorción se define como la transformación energética sufrida por la radiación cuando atraviesa un medio (Ej.: la atmósfera). Como resultado de la misma hay una alteración neta de los niveles energéticos de las moléculas (Sobrino *et al.*, 2000). La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina prácticamente cualquier posibilidad de observación remota (Chuvieco, 1995). Los principales causantes de la absorción son:

- *Oxígeno atómico*, es el responsable de filtrar las radiaciones ultravioleta por debajo de 0.1 μm , así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las micro-ondas.
- *Ozono (O₃)*, es responsable de la eliminación de la energía ultravioleta.
- *Vapor de agua*, absorbe en torno a 6 μm y otras menores entre 0.6 y 2 μm .

- *Anhídrido carbónico* (CO_2), absorbe en el infrarrojo térmico $15\ \mu\text{m}$, con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2.5 y $4.5\ \mu\text{m}$.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta. Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar procesos de teledetección, por lo que el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse (Chuvieco, 1995).

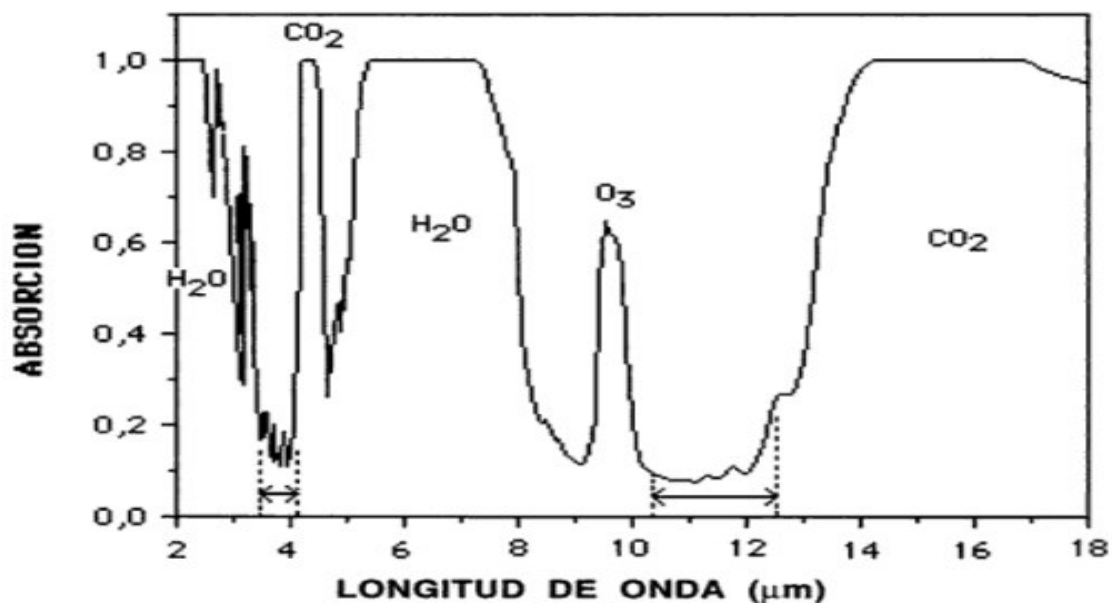


Figura 2.2. Espectro de absorción de la radiación en la atmósfera.

2.2.2. “Scattering” (Dispersión)

La dispersión de la radiación electromagnética es causado por la interacción entre la atmósfera con los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). Es decir, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor. Por tanto, convendrá tener en cuenta este factor, especialmente cuando se pretenda convertir los valores digitales de la imagen a valores de radiancia o reflectancia y se aborden estudios multi-temporales (Chuvieco, 1995). A continuación se detallan los principales tipos de dispersión.

Dispersión de Rayleigh, afecta a las longitudes de onda más cortas. Es la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo, del color azul del cielo. También se denomina dispersión molecular y es causada por las moléculas de nitrógeno y oxígeno presentes en la atmósfera terrestre. La dispersión molecular es estudiada a través de los denominados coeficientes de dispersión, los cuales miden la atenuación de la intensidad de la radiación para un haz incidente (Slater, 1980).

Dispersión de Mie, también es dependiente de la longitud de onda, se presenta especialmente cuando hay choque con aerosol y polvo atmosférico. Se habla de dispersión Mie cuando existen partículas con un diámetro similar a la longitud de onda. La dispersión de Mie depende del tipo de aerosol y de la distribución del tamaño de las partículas (Lira et al., 1983).

Dispersión no-selectiva, se habla cuando existen partículas de gran tamaño. Este tipo de dispersión afecta por igual a las diferentes longitudes de onda. En consecuencia, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas ya que dispersan por igual toda la luz visible (Lira et al., 1983).

Los procesos de dispersión son muy complejos y difíciles de cuantificar en la imagen resultante. Normalmente no se dispone de datos coetáneos a la adquisición de ésta, por lo que la corrección atmosférica se basa en relaciones entre elementos de la propia imagen. Esta estimación puede ser burda en algunos casos, y dificulta en última instancia, el uso de las imágenes adquiridas por sensores espaciales como medida cuantitativa de parámetros biofísicos (Chuvienco, 1995).

2.3. Corrección Atmosférica

Los sensores satelitales capturan la información de la cobertura de la tierra obtenida a partir de la intensidad de radiación electromagnética, misma que proviene de la luz del sol reflejada sobre la superficie terrestre, sumada a la energía dispersada y reflejada por la atmósfera, conocida como radiancia (Aguilar et al., 2014). Esta información de intensidad es transformada a través de una ecuación lineal y almacenada en una representación discreta de números digitales (ND) que tienen una escala artificial, definida según las características de almacenamiento de cada sensor específico, por ejemplo: 8bits, 12bits y 16 bits (Kruse, 2004).

Dado que la escala de los ND depende completamente del sensor y que la radiancia percibida por el sensor depende de la luz solar al momento de la captura de la imagen, no se pueden comparar firmas espectrales en ND de imágenes de sensores

distintos o inclusive del mismo sensor si fueron capturadas en momentos diferentes, por lo que es necesario convertir los datos de la escala de ND a una escala espectral normalizada (Edwards, 1998). Por tanto, la corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello se requiere: 1) convertir los ND de cada banda a valores de radiancia (L), 2) la radiancia se transforma a valores de reflectividad TOA y 3) se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia de la superficie (Kruse, 2004). Los efectos de dispersión y distorsión atmosféricos se compensan por medio de fórmulas matemáticas, en este caso planteadas por el modelo MODTRAN 4 que es el modelo base de la extensión FLAASH (Aguilar et al., 2014).

2.3.1. El modelo FLAASH

El modelo FLAASH toma como base una ecuación estándar para la radiancia espectral de un pixel en el sensor, L , aplicado para el intervalo de longitud de onda solar (la emisión térmica es despreciada), en materiales Lambertianos o equivalentes (Matthew et al., 2000). La ecuación es la siguiente:

$$L = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e * S} \right) + \left(\frac{B * \rho_e}{1 - \rho_e * S} \right) + L_a \quad (2.1)$$

donde, ρ representa la reflectancia superficial del pixel, ρ_e la reflectancia superficial promedio del pixel y la región de entorno, S es el albedo esférico de la atmósfera, L_a es parte de la radiación dispersada por la atmosfera y $A - B$ son los coeficientes que depende de las condiciones atmosféricas y geométricas pero no de la superficie.

Cada uno de estos términos depende de la banda espectral; el índice longitud de onda tiene que ser omitido por simplicidad. El primer término de la ecuación (2.1) corresponde a la radiancia que es reflejado de la superficie y llega directamente al sensor, mientras el segundo término corresponde a la radiancia de la superficie que es dispersado por la atmósfera hacia el sensor. La diferencia entre ρ y ρ_e corresponde a efectos de adyacencia (mezcla espacial de radiancia entre pixeles cercanos) causado por la dispersión atmosférica. Para ignorar la corrección de los efectos adyacentes, establecemos $\rho = \rho_e$. Sin embargo, esta corrección puede dar resultados con errores de reflectancia significativos en longitudes de onda corta, especialmente bajo las condiciones de nubosidad y cuando ocurre un contraste entre las superficies de la escena (Badaracco, 2012).

Los valores de A , B , S y L_a son determinados a partir de los cálculos de MODTRAN 4 que utiliza los ángulos de observación, solar y la elevación promedio de la superficie de las mediciones, y ello asume un cierto modelo atmosférico, tipo de aerosol y rango visible. Los valores de A , B , S y L_a dependen fuertemente de la cantidad de vapor de agua en las columnas, que generalmente no se conoce y puede variar de acuerdo a la escena. Para responder a variables de las columnas de vapor de agua desconocido, los cálculos MODTRAN 4 son orientados sobre una serie de diferentes cantidades de vapor de agua en las columnas, luego las bandas de longitudes seleccionadas de una imagen son analizadas para recuperar una cantidad estimada por cada pixel. Específicamente la radiancia promedio son tomados de dos conjuntos de bandas: un conjunto de absorción centrada en la banda de agua (típicamente de 1130 nm) y una referencia de bandas tomadas simplemente fuera de

la banda. Una tabla de búsqueda para recuperar la cantidad de vapor de agua de estas radiancias se estableció. Para las imágenes que no contienen bandas con longitudes de ondas apropiadas para el soporte de recuperación de agua (por ejemplo, LANDSAT o SPOT), la cantidad de vapor de agua de la columna es determinado por el modelo atmosférico seleccionado por el usuario. Después de realizada la recuperación de la cantidad de vapor agua, la ecuación (2.1) es solucionada para la reflectancia superficial del pixel en todas las bandas del sensor. El método de la corrección atmosférica implica calcular una imagen de radiancia promedio espacial L_e del cual la reflectancia promedio espacial ρ_e es estimada usando la ecuación aproximada (Badaracco, 2012):

$$L_e \approx \left(\frac{(A + B) * \rho_e}{1 - \rho_e * S} \right) + L_a \quad (2.2)$$

donde L_e representa la radiancia promedio espacial, ρ_e la reflectancia superficial promedio del pixel y la región de entorno, S es el albedo esférico de la atmósfera, L_a es parte de la radiancia dispersada por la atmósfera y $A - B$ son los coeficientes que dependen de las condiciones atmosféricas y geométricas, pero no de la superficie.

La imagen de radiancia promedio espacial es realizada usando una función de dispersión de puntos que describe las contribuciones relativas para la radiancia del pixel de puntos sobre el terreno para diferentes distancias de la línea de visión directa. Para resultados precisos, los pixeles que contienen nubes deben ser removidos antes de promediar. Los pixeles nublados son encontrados usando una combinación de brillos, razón de banda y pruebas de vapor de agua (Matthew et al., 2000).

2.4. Reflectancia de las superficies terrestres

Todos los tipos de cobertura terrestre (tipos de roca, cuerpos de agua, tipos de vegetación, cascos urbanos, etc.), absorben una parte de la radiación electromagnética, dándole una firma distinguible de otra a lo largo del espectro. Se puede analizar los datos de las imágenes provenientes de sensores remotos y crear hipótesis bastante precisas acerca de una cobertura gracias a su firma espectral (Slater, 1980.).

Una *firma espectral* se define como la respuesta de distintos materiales de la superficie de la tierra a la radiación solar incidente en función de la longitud de onda λ . En la Figura 2.3, se muestra las gráficas de las firmas espectrales del agua, vegetación sana, vegetación estresada y suelo.

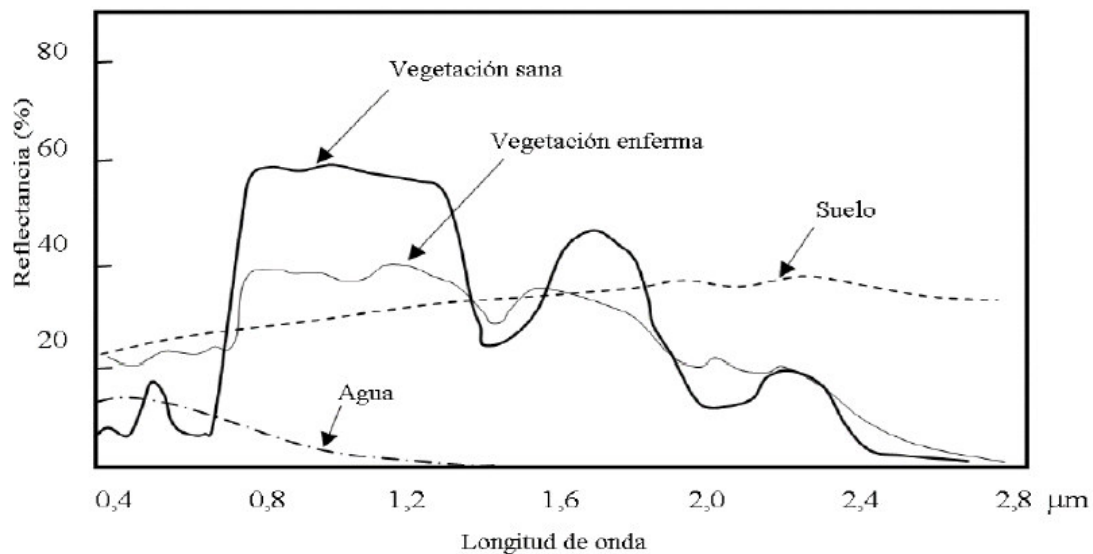


Figura 2.3. Firmas espectrales típicas de la vegetación, suelo y agua en el rango visible e infrarrojo del espectro electromagnético (Hernández y Montaner.2009).

2.4.1. Factores que determinan la respuesta espectral típica de la vegetación

En la Figura 2.4, se muestra la curva de reflectividad típica de la vegetación sana, indicando las regiones espectrales más significativas de ella y la causa predominante de la forma de dicha curva para distintas longitudes de onda. Presentan un máximo hacia $0.5 \mu\text{m}$, un mínimo hacia $0.6 \mu\text{m}$, un aumento brusco hacia $0.7 \mu\text{m}$ que se mantiene constante hasta los $1.3 \mu\text{m}$ seguido por un nuevo mínimo a $1.4 \mu\text{m}$.

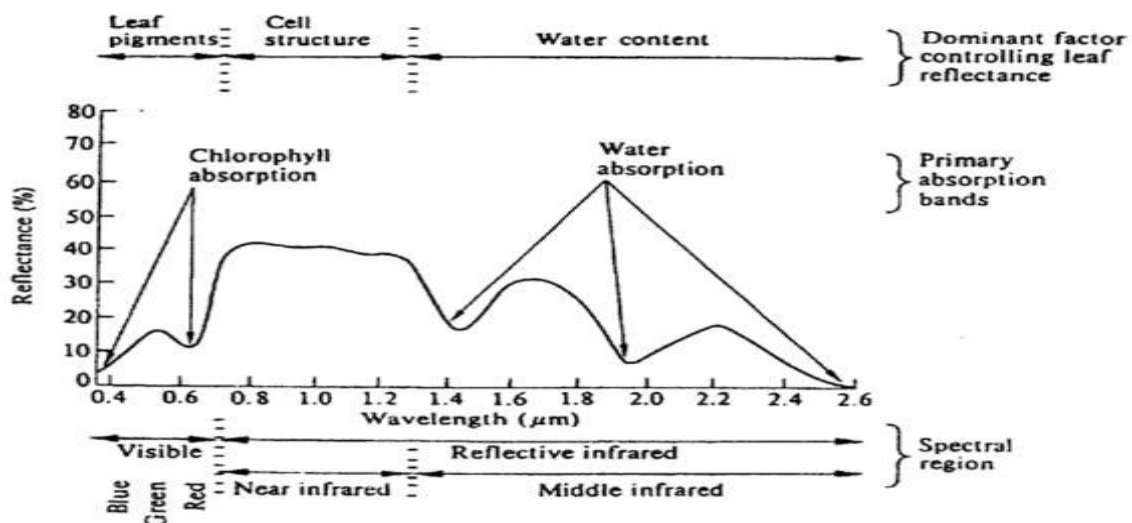


Figura 2.4. Curva de reflectividad típica de la vegetación sana (Gandía et al., 1991).

Como se indica en la figura 2.4, de forma general, en las longitudes de onda visibles los pigmentos son los responsables de la respuesta espectral de las hojas: la clorofila es particularmente importante. En la región del infrarrojo próximo, la reflectividad crece notablemente a causa de la escasa absorción de las plantas en esas longitudes de onda. En la región del infrarrojo medio, el agua contenida en la hoja es la responsable de la baja reflectividad que presenta, ya que el agua tiene un máximo de absorción en dicha región espectral. Los valores de reflectividad varían

de una especie a otra y además dependen del estado hídrico de la planta. La forma que se muestra en la Figura 2.4, representa a cualquier especie vegetal sana (Gandía et al., 1991).

Se observa que la reflectividad es muy baja en las zonas del espectro visible correspondiente al azul y al rojo. Esta baja reflectividad está relacionada con la clorofila contenida en la planta, ya que ambos mínimos coinciden con los máximos de absorción que en estos intervalos tiene la clorofila. La absorción relativamente baja entre los dos máximos de absorción de la clorofila, determina un pico en la reflectividad de la planta en la región del espectro visible correspondiente a las longitudes de onda del verde, y es la causante de que la vegetación sana aparezca verde a nuestros ojos. Cuando una planta está sometida a cualquier tipo de tensión, hídrica o de otro tipo, disminuye la producción de clorofila y la planta absorbe menos energía en las regiones típicas de absorción por clorofila, aumentando la energía reflejada especialmente en la región del rojo, los que les proporciona la apariencia amarillenta o clorótica (Gandía et al., 1991).

2.4.2. Respuesta espectral típica de un apilado de hojas

La cubierta vegetal es el conjunto de hojas y otros elementos tales como: suelo y sombras. Es muy arriesgado por tanto hablar de respuesta espectral típica de un cultivo. El sólo hecho de apilar más de una hoja ya modifica notablemente la media espectral que se obtiene respecto a la de una sola hoja. En la Figura 2.5, se observa este efecto para el caso particular de apilamiento de dos hojas: si sólo se tuviera una hoja, la reflexión máxima que se produce (despreciando la absorción) sería igual a

la mitad de la radiación incidente; sin embargo con dos hojas la energía total reflejada es igual a $(5/8)$ de la incidente. Evidentemente si tuviéramos más hojas esta cantidad todavía sería mayor (Sobrino, 2000).

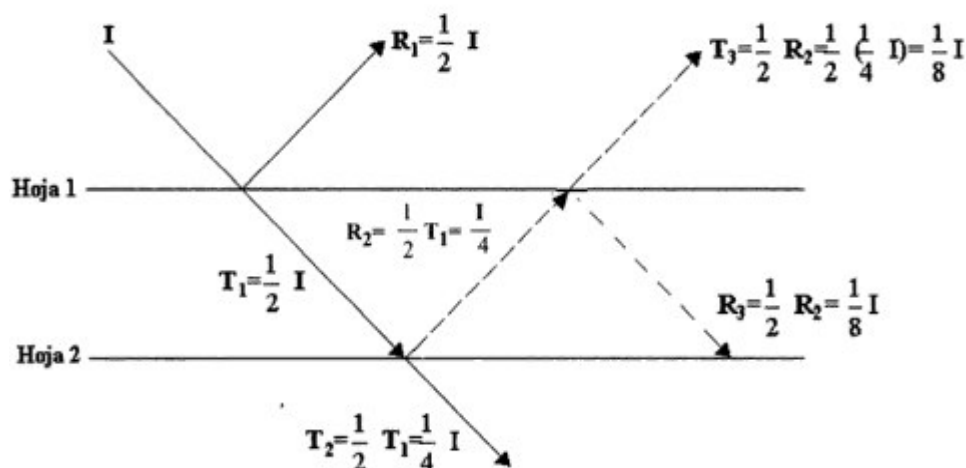


Figura 2.5. Modelo de la respuesta espectral de un apilado de dos hojas (Sobrino, 2000).

2.5. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El índice de vegetación normalizado (NDVI) es un indicador numérico que utiliza las bandas visible e infrarroja cercana del espectro electromagnético, y es adoptado para analizar las mediciones de sensores remotos y evaluar si el objetivo que se observa contiene vegetación verde viva o no (Rouse et al., 1974). El NDVI es también un parámetro importante en varios tipos de modelos a escala local, regional y global (Maskova et al., 2008). Por tanto el índice de vegetación que se utilizó en este trabajo, fue el NDVI, debido a ser un buen indicativo de la actividad fotosintética de las plantas (Bannari et al., 1995).

Este índice de vegetación es determinado usando el rojo e infrarrojo cercano de las bandas de una imagen dada y está expresado por la ecuación (2.3): (Rouse, *et al.*, 1974)

$$NDVI_{TM-ETM+} = \frac{\rho(NIR) - \rho(RED)}{\rho(NIR) + \rho(RED)} \quad (2.3)$$

Donde ρ_{NIR} y ρ_{RED} son los valores de reflectancia de la superficie. Los valores del NDVI varían de -1 a +1. Debido a la absorción de la luz por la clorofila, la reflexión del espectro (rojo) es siempre inferior que en el infrarrojo cercano NIR para la vegetación verde. Por tanto, los valores de NDVI para la vegetación no pueden ser inferiores a 0.

En un sentido práctico, los valores que son iguales o inferiores a 0.1 corresponden a cuerpos terrestres desnudos y de agua debido a su muy baja reflectancia en la banda del infrarrojo cercano NIR. Los valores comprendidos en el rango (0.2 - 0.5) están relacionados con la escasa vegetación de pastizales y arbustos, y los valores de NDVI cercanos a 1 indican la mayor densidad posible de hojas verdes (Silva A., 2014).

2.6. Series de tiempo

La serie de tiempo se define como una colección de observaciones hechas secuencialmente a través de un periodo de tiempo, uno de los requerimientos principales para la realización de una serie de tiempo es que el sensor utilizado tenga la característica de cubrir repetidamente la misma área a través del tiempo, o

sea, que el sensor tenga una alta resolución temporal para poder determinar los cambios en la cobertura vegetal (Colditz R., 2007).

La generación de una acertada serie de tiempo es uno de los procesos más importantes al momento de trabajar con información obtenida de sensores remotos, ya que niveles de ruido y múltiples fuentes de error requieren de un análisis antes o durante la generación de las series de tiempo. Además de las características de los sensores, las nubes, gases y aerosoles atmosféricos son algunas de las mayores fuentes de error presentes en datos multiespectrales, los cuales deben ser removidos o interpolados especialmente cuando se trabaja con índices de vegetación como el EVI, NDVI, FPAR, entre otros (Colditz R., 2007).

2.6.1. Enfoques para la generación de Series de tiempo

La generación de series de tiempo para información obtenida de sensores remotos como imágenes MODIS en aplicaciones terrestres se puede clasificar en tres categorías principales, las cuales se mencionan a continuación. (Colditz R., 2007).

2.6.1.1. Composición y apilado de la información

La más común y frecuente aproximación aplicada a la generación de las series de tiempo es el valor máximo y mínimo de composición y apilado (MVC), para composites de múltiples días. Este método consiste en almacenar en un composite el valor más alto para cada pixel analizado individualmente de toda la serie de tiempo. El método MVC ha sido aplicado principalmente en índices de vegetación

NDVI. Muchos estudios han sido basados en series de tiempo MCV como: mapas de cobertura, análisis fenológicos y detección de cambios.

2.6.1.2. Filtrado

La función de Filtrado es otra posibilidad para la generación de series de tiempo para observaciones individuales o composites generados previamente. Este proceso asume características de filtrado constantes para las series de tiempo. Usualmente se asume que los datos son muestreados en intervalos iguales, pero algunas aproximaciones como la del filtrado constante pueden también realizarse con muestreos de datos no equidistantes.

2.6.1.3. Datos auxiliares

La tercera categoría general para la generación de series de tiempo evalúa la información auxiliar como por ejemplo los indicadores de calidad de los datos. Si la calidad de los datos es muy baja para unas observaciones dadas, el pixel es excluido del análisis y puede ser interpolado espacial o temporalmente.

2.6.2. Análisis estadístico de las series de tiempo

El análisis estadístico de series temporales permite identificar los patrones de comportamiento a corto y largo plazo (estacionalidad, tendencia, ciclo, componente irregular) de una variable (Huesca M., 2009).

2.6.2.1. Análisis gráfico de una serie de tiempo

El primer paso en el análisis de series de tiempo, consiste en graficar la serie, esto nos permite observar el comportamiento de la serie de datos a lo largo del tiempo y

detectar los componentes esenciales de la serie como: tendencia, variación estacional y detectar Outliers.

2.6.2.2. Componente de tendencia.

La tendencia representa el comportamiento predominante de la serie a largo plazo, ya sea para aumentar, disminuir o mantenerse estable durante un largo período de tiempo.

2.7. Máximo y Mínimo Valor Compuesto (MVC)

La información de los Índices de Vegetación recolectados a través de Satélites de Observación Terrestre, pueden ser afectados por diversos factores tales como la iluminación y visualización de la geometría, las nubes, aerosoles, la sombra y el vapor de agua, los cuales podrían generar algunos valores ruidosos (Silva A., 2014).

La gestión y análisis de largas series del NDVI obliga a recurrir a las composiciones periódicas del valor máximo. Los estudios multi-temporales se basan en la superposición espacial de todas las imágenes consideradas en el estudio, haciendo uso de cuanta información se dispone, es decir, utilizando como bandas conjuntamente las de todas las fechas (Gandía, 1991)

El Máximo Valor Compuesto “MVC” del NDVI es una imagen resultante de un periodo discreto de observaciones (por ejemplo 10, 12, 15, 16 días), en la que cada píxel toma el valor máximo del NDVI alcanzado durante ese periodo. Esta selección determina el momento de mayor verdor dentro del periodo y, por lo tanto, la menor distorsión o contaminación por nubes u otros factores atmosféricos. (Yagüe J., 2000)

La deficiente calidad de las observaciones puede afectar el análisis posterior de los datos y limitar el uso de estos. Por tanto, el proceso del Máximo/Mínimo Valor Compuesto (MVC) puede ayudar a lidiar con este problema, eliminando una parte significativa de este ruido. El cual consiste en el análisis de los valores de los Índices de vegetación sobre una base de pixel por pixel, en un periodo de tiempo predefinido y conservar el valor más alto para cada posición de pixel, Figura 2.6. (Silva A., 2014).

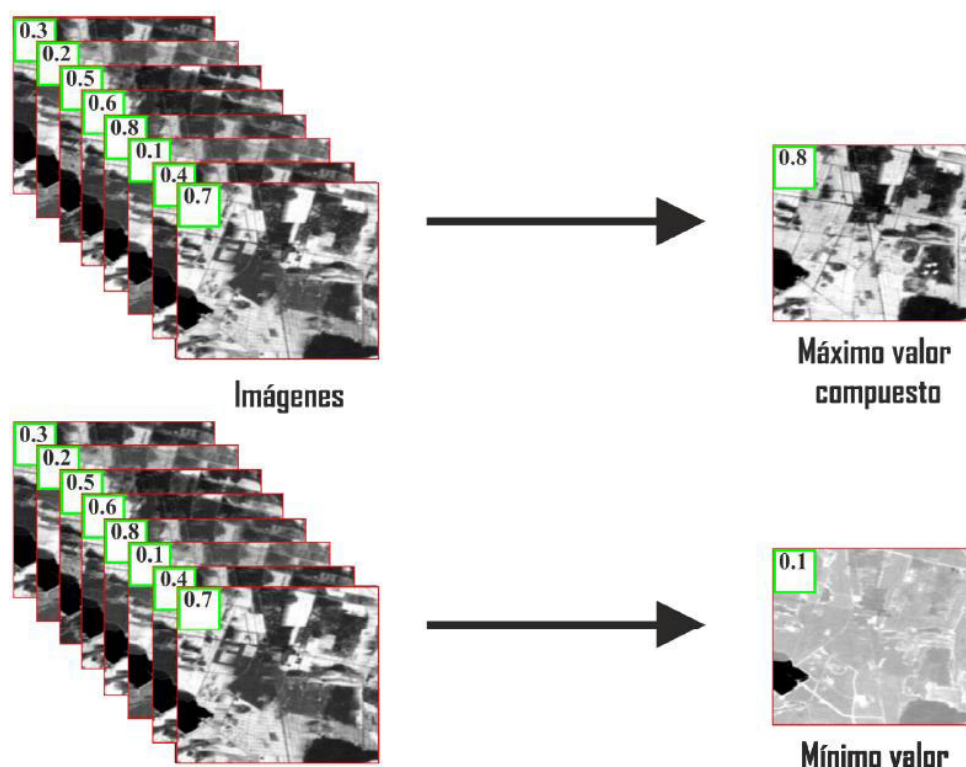


Figura 2.6. Máximo y mínimo valor compuesto de una serie de imágenes de fechas distintas.

2.8. Coeficiente de correlación de Pearson

Según Spiegel (1992), es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas y tiene por objeto medir la relación entre las variables. Se define de la siguiente manera:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.4)$$

El coeficiente de correlación de Pearson de la ecuación (2.4), es aplicado en este trabajo para medir la relación lineal existente entre la estimación de las áreas deforestadas por minería aurífera en la región de interés y el precio promedio anual del oro, durante el periodo 2006 – 2015. Los resultados se muestran en la figura 5.17 del capítulo 5.

Capítulo 3:

Área de estudio y datos utilizados

El presente capítulo describe el área de estudio y los datos adquiridos. En primer lugar, se muestra la ubicación y las coordenadas geográficas que limita el área de estudio. Posteriormente, se listan las escenas registradas por los sensores TM, ETM+ y OLI, utilizadas conjuntamente con el modelo de elevación digital del sensor ASTER GDEM y los datos productos NDVI proporcionados por el sensor MODIS / TERRA.

3.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio corresponde a la Quebrada Guacamayo, ubicado en el distrito de Inambari, provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios – Perú. La Quebrada Guacamayo atraviesa transversalmente la carretera Interoceánica Perú – Brasil, y se extiende entre los ríos Inambari y Malinowski. El departamento de Madre de Dios está ubicado en la Selva sur del Perú y es limítrofe con Brasil y Bolivia. Geográficamente el área de estudio está comprendido entre las coordenadas geográficas: Latitud: $-12^{\circ}45'05.34''$ / $-13^{\circ}02'57.39''$ y Longitud: $-70^{\circ}08'22.10''$ / $-69^{\circ}51'56.94''$. Utilizando la proyección UTM, Zona 19S y Datum WGS-84, el área de interés (Figura 3.1), está ubicado entre las coordenadas: Este: 376305.00 / 406125.00 y Norte: 8590075.00 / 8557255.00.

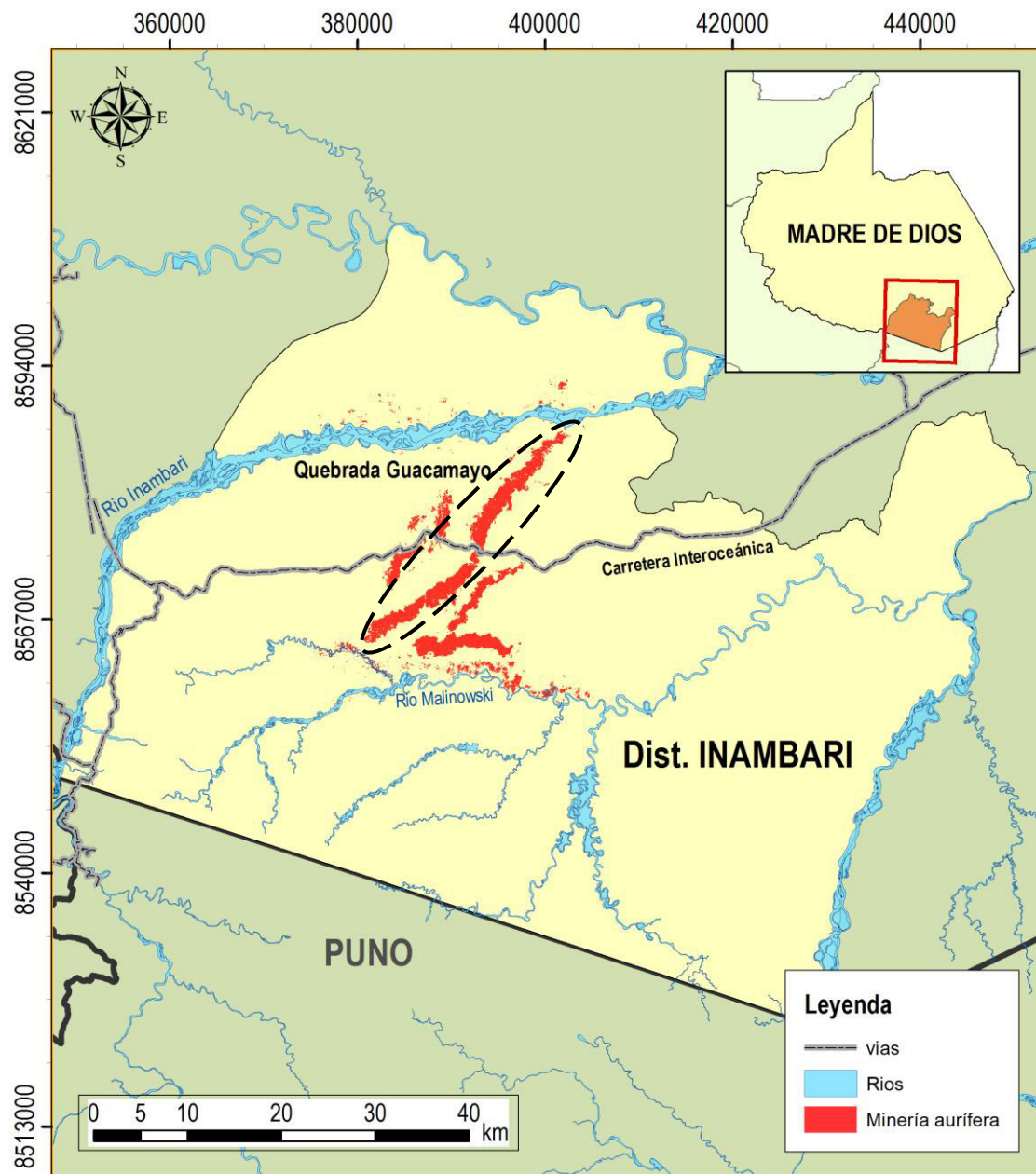


Figura 3.1. Ubicación de la Quebrada Guacamayo, distrito de Inambari (círculo punteado de color negro) (**Fuente:** Elaboración propia).

3.2. Datos productos MODIS.

Los productos MOD13Q1 del sensor MODIS/Terra, son datos globales que proveen imágenes de NDVI con un intervalo de 16 días y resolución espacial de 250 m x 250 m como producto de nivel L3 en proyección sinusoidal. Las dimensiones de las escenas son de 1200 km x 1200 km, compuestas por 4800 columnas x 4800 filas. En este trabajo se descargaron un total de 365 imágenes NDVI - MOD13Q1, en formato GEOTIFF, para el periodo 2000 – 2015. Estas imágenes almacenan datos de tipo entero, con una estructura de 16 bits. Las imágenes son adquiridas de forma gratuita de la siguiente página web: <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>, en coordenadas geográficas de latitud/longitud, datum WGS84 y tamaño de pixel igual a 0.002127 grados (~250 m).

3.3. Datos imágenes TM, ETM+ y OLI

Las imágenes multiespectrales de los sensores TM, ETM+ y OLI de los satélites Landsat 5, 7 y 8 respectivamente, son de acceso libre a través de la página web del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS): <http://glovis.usgs.gov/>. Para el área de estudio, se adquirieron 10 imágenes multiespectrales. Las escenas descargadas son proporcionadas en formato GEOTIFF como producto de nivel L1T, con un intervalo de 16 días, a una resolución espacial de 30 m x 30 m, proyección UTM 19S, datum y elipsoide de referencia WGS-84, (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Datos imágenes adquiridas de los satélites Landsat.

N°	Satélite	Sensor	WRS Path / Row	Fecha de adquisición	Tipo de data	Zona	Proyección	DATUM
01	Landsat 5	TM	003/069	04/08/2006	L1T	19 S	UTM	WGS84
02		TM	003/069	23/08/2007	L1T	19 S	UTM	WGS84
03		TM	003/069	10/09/2008	L1T	19 S	UTM	WGS84
04		TM	003/069	28/08/2009	L1T	19 S	UTM	WGS84
05		TM	003/069	16/09/2010	L1T	19 S	UTM	WGS84
06		TM	003/069	03/09/2011	L1T	19 S	UTM	WGS84
07	Landsat 7	ETM+	003/069	15/10/2012	L1T	19 S	UTM	WGS84
08		ETM+	003/069	31/08/2013	L1T	19 S	UTM	WGS84
09	Landsat 8	OLI/TIRS	003/069	10/08/2014	L1T	19 S	UTM	WGS84
10		OLI/TIRS	003/069	29/08/2015	L1T	19 S	UTM	WGS84

Los criterios para seleccionar las imágenes multiespectrales fueron los siguientes.

- Adquisición de una imagen por año, entre los meses de julio a octubre, debido a la menor frecuencia de lluvias en este periodo, por tanto los sensores a bordo de las plataformas satelitales capturan mejores escenas.
- Selección de imágenes con menor porcentaje de nubosidad (<10%),
- En el caso de las imágenes del sensor ETM+ que presentan errores de bandeo (a partir del año 2003), se seleccionó una imagen del año 2012 y una del 2013, en ambos casos siguiendo los criterios anteriores. A estas imágenes se optó por aplicar la herramienta *Gapfill*, incluida en el software de procesamiento Envi v5.2, para corregir los errores de bandeo.

Todas las imágenes del sensor OLI (Landsat 8) que corresponden al periodo 2013, tuvieron un porcentaje de nubosidad muy por encima del 10% sobre el área de estudio. Por tal razón, se procedió a seleccionar una imagen del sensor ETM+ (Landsat 7) que tuviera un porcentaje de nubosidad inferior al 10%.

3.4. Datos ASTER GDEM

Es un modelo digital de elevación (DEM), de 30 m x 30 m de resolución espacial. Está en formato GEOTIFF y son de acceso libre a través del portal web ASTER GDEM (2013): <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>. Se adquirieron, cuatro archivos comprimidos en formato ZIP. Cada archivo, contiene una imagen en formato GEOTIFF con proyección geográfica latitud/longitud, datum WGS84 y tamaño de pixel igual a 0,00027778 grados (~30 m) (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Datos DEM adquiridos.

Escena	Código de imagen	Coordenadas geográficas superior izquierda (Latitud/Longitud)	Dimensión (filas x columnas)	Datum	Tamaño de pixel (Grados)
Escena 1	ASTGTM_S13W070_dem	70°0'0.50''W 11°59'59.50''S	3601 x 3601	WGS84	0,00027778
Escena 2	ASTGTM_S13W071_dem	71°0'0.50''W 11°50'59.50''S	3601 x 3601	WGS84	0,00027778
Escena 3	ASTGTM_S14W070_dem	70°0'0.50''W 12°59'59.50''S	3601 x 3601	WGS84	0,00027778
Escena 4	ASTGTM_S14W071_dem	71°0'0.50''W 12°59'59.50''S	3601 x 3601	WGS84	0,00027778

Capítulo 4:

Metodología

4.1. Preprocesamiento de los datos imágenes de satélite

En los datos imágenes, la data está almacenada en formato 8-bit, es decir, un número entero entre 0 y 255, llamado número digital (ND). El ND depende no sólo de las condiciones del suelo, vegetación, sino también de la calibración del sensor, el ángulo de elevación solar, el ángulo de visión del sensor, la distancia Tierra-Sol y las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. Por tanto, es necesario convertir el ND en un valor que tenga en cuenta la calibración del sensor y sea independiente de las condiciones atmosféricas. Ese valor es la reflectancia de la superficie. Los siguientes apartados de este capítulo, tratan sobre los pasos seguidos en el tratamiento de las imágenes utilizando como herramienta el software ENVI v5.2.

4.1.1. Calibración radiométrica de datos imágenes de satélite

El cálculo de la radiancia espectral en el sensor es el paso fundamental en la conversión de los datos de las imágenes crudas de los múltiples sensores, a una magnitud física a escala radiométricamente común (Chander et al., 2009). Por tanto la capacidad para detectar y cuantificar los cambios en el medio terrestre depende de sensores calibrados que puedan proporcionar exactitud, precisión y consistente mediciones de características de la superficie de la tierra a través del tiempo. La caracterización y calibración radiométrica es un requisito previo para la creación de datos científicos de alta calidad y, en consecuencia, productos derivados de alto nivel (Chander et al., 2009).

4.1.1.1. Números digitales a radiancia espectral de las imágenes TM y ETM+

Consiste en cambiar la escala de los números digitales crudos (Q), transmitidos desde el satélite, a números digitales calibrados (Q_{cal}), el cual tiene la misma escala radiométrica para todas las escenas procesadas por un periodo específico. Los valores de radiancia absoluta son escalados a 8-bit (TM y ETM+, $Q_{calmax}=255$). La conversión de Q_{cal} a radiancia espectral (L_λ), requiere el conocimiento del límite inferior y superior de los factores de cambio de escala originales. La siguiente ecuación se utiliza para realizar la conversión de Q_{cal} a L_λ (Chander et al., 2009):

$$L_\lambda = G_r * Q_{cal} + B_r \quad (4.1)$$

donde, L_λ representa la radiancia espectral en la apertura del sensor, Q_{cal} es el valor cuantificado del pixel calibrado, G_r es el factor de ganancia escalado de una banda específica y B_r es el factor de sesgo escalado de una banda específica. El factor de ganancia G_r y el factor sesgo B_r , se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$G_{reescalado} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \quad (4.2)$$

$$B_{reescalado} = L_{min\lambda} - \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) * Q_{calmin} \quad (4.3)$$

donde, Q_{calmin} representa el valor mínimo cuantificado del pixel calibrado correspondiente a $L_{min\lambda}$, Q_{calmax} es el valor máximo cuantificado del pixel calibrado correspondiente a $L_{max\lambda}$, $L_{min\lambda}$ es la radiancia espectral en el sensor que esta escalado a Q_{calmin} y $L_{max\lambda}$ es la radiancia en el sensor que esta escalado a Q_{calmax} .

Tabla 4.1. Valores máximos y mínimos de radiancia del sensor TM (Chander et al., 2009).

L5 TM (LPGS)						
<i>Banda</i>	<i>Intervalo espectral</i> (μm)	L_{\min} $\frac{w}{(m^2 sr m)}$	L_{\max} $\frac{w}{(m^2 sr m)}$	$G_{rescale}$ $\frac{w/(m^2 sr m)}{ND}$	$B_{rescale}$ $\frac{w}{(m^2 sr m)}$	$ESUN_{\lambda}$ $w/(m^2 m)$
1	0.452 – 0.518	-1.52 -1.52	169 193	0.671339 0.765827	-2.19 -2.29	1983
2	0.528 – 0.609	-2.84 -2.84	333 365	1.322205 1.448189	-4.16 -4.29	1796
3	0.626 – 0.693	-1.17	264	1.043976	-2.21	1536
4	0.776 – 0.904	-1.51	221	0.876024	-2.39	1031
5	1.567 – 1.784	-0.37	30.2	0.120354	-0.49	220.0
6	10.45 – 12.42	1.2378	15.3032	0.055376	1.18	N/A
7	2.097 – 2.349	-0.15	16.5	0.065551	-0.22	83.44

Los coeficientes de escalamiento radiométricas para el sensor TM, bandas 1 y 2 durante, aproximadamente, los primeros ocho años de la misión (1984-1991), fueron cambiados para optimizar el intervalo dinámico y obtener una mejor preservación de la sensibilidad de los datos de las misiones iniciales. En la Tabla 4.1, las cifras resaltadas de color gris (L_{\max} = 169, 333) son los intervalos dinámicos revisados después de la calibración para sensor TM, Banda 1 y 2, datos adquiridos entre el 1 de Marzo 1984 (lanzamiento), y 31 de diciembre de 1991 (Chander et al., 2007).

Tabla 4.2. Valores máximos y mínimos de radiancia, en modo de baja y alta ganancia del sensor ETM+ (Chander et al., 2009).

L7 ETM+ (LPGS)						
<i>Banda</i>	<i>Intervalo espectral</i> (μm)	$\frac{L_{min}}{w}$ ($\text{m}^2\text{sr m}$)	$\frac{L_{max}}{w}$ ($\text{m}^2\text{sr m}$)	$\frac{G_{rescale}}{w / (\text{m}^2\text{sr } \mu\text{m})}$ ND	$\frac{B_{rescale}}{w}$ ($\text{m}^2\text{sr m}$)	$ESUN_{\lambda}$ $w / (\text{m}^2 \mu\text{m})$
Baja ganancia						
1	0.452 – 0.514	-6.2	293.7	1.180709	-7.38	1997
2	0.519 – 0.601	-6.4	300.9	1.209843	-7.61	1812
3	0.631 – 0.692	-5.0	234.4	0.942520	-5.94	1533
4	0.772 – 0.898	-5.1	241.1	0.969291	-6.07	1039
5	1.547 – 1.748	-1.0	47.57	0.191220	-1.19	230.8
6	10.31 – 12.36	0.0	17.04	0.067087	-0.07	N/A
7	2.065 – 2.346	-0.35	16.54	0.066496	-0.42	84.90
PAN	0.515 – 0.896	-4.7	243.1	0.975591	-5.68	1362
Alta ganancia						
1	0.452 – 0.514	-6.2	191.6	0.778740	-6.98	1997
2	0.519 – 0.601	-6.4	196.5	0.798819	-7.20	1812
3	0.631 – 0.692	-5.0	152.9	0.621654	-5.62	1533
4	0.772 – 0.898	-5.1	157.4	0.639764	-5.74	1039
5	1.547 – 1.748	-1.0	31.06	0.126220	-1.13	230.8
6	10.31 – 12.36	3.2	12.65	0.037205	3.16	N/A
7	2.065 – 2.346	-0.35	10.80	0.043898	-0.39	84.90
PAN	0.515 – 0.896	-4.7	158.3	0.641732	-5.34	1362

4.1.1.2. Números digitales a radiancia espectral de las imágenes OLI

Las imágenes del sensor OLI son procesadas en unidades de radiancia absoluta, usando cálculos de puntos flotantes de 32-bits. Estos valores luego son convertidos a valores enteros de 16 bits que son productos terminados de nivel 1. Estos valores son convertidos luego a radiancia espectral usando los factores de escalamiento de radiancia proporcionado en el archivo de metadatos (USGS, 2016b).

Los números digitales de las imágenes son convertidos a valores de radiancia a través de la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (4.4)$$

donde, L_{λ} es la radiancia espectral detectada por el sensor en un determinado canal, M_L es el factor multiplicativo de escalado específico de la banda obtenido del metadato, A_L es el factor aditivo de escalado específico de la banda obtenido del metadato y Q_{cal} corresponde al valor del pixel en números digitales (ND).

4.1.1.3. Radiancia espectral a reflectancia TOA de las imágenes TM y ETM+

Chander y Markham (2003) señalan que cuando se comparan imágenes de distintas fechas es ventajoso transformar los valores de radiancia en reflectancia porque se remueve el efecto producido por ángulo solar y se compensan las diferencias en los valores de la irradiancia solar extra-atmosférica. Es así, que los valores de radiancia de las imágenes de los sensores TM y ETM+, son convertidos en reflectancia TOA utilizando la siguiente ecuación del Landsat Science Data Users Handbook (Williams, 2004):

$$\rho_p = \frac{\pi * L * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos\theta} \quad (4.5)$$

donde, ρ_p representa la reflectancia TOA, L es la radiancia espectral en la apertura del sensor, $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia exoatmosférica solar promedio de cada banda, θ es el ángulo cenit del Sol y d es la razón de la distancia Tierra - Sol actual y la

distancia Tierra-Sol promedio, que se puede calcular a través de la siguiente ecuación (Chander et al., 2009):

$$d = \left(1 - 0.01672 * \cos \left(\text{RADIAN}(0.9856 * (d_n - 4)) \right) \right) \quad (4.6)$$

donde d_n representa el día juliano. Los valores de distancia Tierra – Sol, para cada día del año, se muestran en la Tabla B.1 del anexo B.

4.1.1.4. Radiancia espectral a reflectancia TOA de las imágenes OLI

Similar de la conversión a radiancia, el valor entero de 16 bits del producto L1 es también convertido a reflectancia TOA. La siguiente ecuación es utilizada para convertir valores de ND nivel 1 a valores de reflectancia TOA (USGS, 2016b):

$$\rho'_\lambda = M_p * Q_{cal} + A_p \quad (4.7)$$

donde ρ'_λ representa la reflectancia espectral TOA sin corrección de ángulo solar, M_p es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del archivo metadato, A_p es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del archivo metadato y Q_{cal} es el valor de pixel nivel 1 en números digitales.

La ρ'_λ , no es aún la verdadera reflectancia TOA, debido a que no contiene una corrección por el ángulo de elevación solar. Una vez el ángulo de elevación solar es elegido, la conversión a reflectancia TOA es como sigue (USGS, 2016b):

$$\rho_\lambda = \frac{\rho'_\lambda}{(\sin \theta)} \quad (4.8)$$

donde ρ_λ representa la reflectancia TOA (sin unidades) y θ es el ángulo de elevación solar (obtenido del archivo metadato).

4.1.2. Corrección atmosférica utilizando el modelo FLAASH

El modelo, *Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), fue utilizado en el presente trabajo para realizar las correcciones atmosféricas de las imágenes obtenidas. FLAASH es un algoritmo sofisticado basado en el *Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model* (MODTRAN), que puede compensar los efectos atmosféricos más exactamente. La corrección atmosférica (o compensación) de las imágenes espectrales se refiere a la recuperación de la reflectancia espectral de la superficie de las radiancias medidas. La corrección atmosférica es un prerequisite a muchas aproximaciones del análisis de los datos de imágenes. El algoritmo FLAASH, sigue básicamente, el modelo de transferencia radiativa mostrada debajo (Gao et al., 1990), además, adiciona un término para tomar en cuenta los efectos adyacentes (Adler et al., 1999):

$$L_0(\lambda) = L_{sol}(\lambda) * T_\lambda * R_\lambda * \cos(\theta) + L_{camino}(\lambda) \quad (4.9)$$

donde, λ representa la longitud de onda, $L_0(\lambda)$ es la radiancia observada en el sensor, $L_{sol}(\lambda)$ es la radiancia del sol sobre la atmosfera, T_λ es la transmitancia atmosférica total, R_λ es la reflectancia de la superficie, θ es el ángulo de incidencia y $L_{camino}(\lambda)$ es la radiancia dispersada en el trayecto.

4.1.2.1. Parámetros que requiere el módulo FLAASH

El módulo FLAASH del software ENVI v5.2, viene representado por un interfaz gráfico en donde se establecen todos los parámetros de entrada. Requiere como ingreso imágenes que se encuentre en radiancia espectral de punto flotante en unidad de $\mu W/(cm^2.sr.nm)$ y en formato de bandas Intercaladas por Líneas (BIL) o formato de bandas Intercaladas por Pixel (BIP). En las imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI, se divide entre el factor de escala de 10 para pasar de $W/(m^2.sr.\mu m)$ a $\mu W/(cm^2.sr.nm)$ (ITT Visual Information Solutions, 2009. Citado por Renato S., 2015).

Además del archivo de la imagen que debe corregirse, FLAASH también necesita información sobre la coordenada geográfica del centro de la imagen, la fecha y hora del momento en que fue registrado y la altura en que se encuentra el sensor. Estas informaciones deben ser introducidas por el usuario. El sensor se puede especificar de una extensa lista de sensores multiespectrales e hiperespectrales para los que se conocen sus funciones de respuesta espectral relativa.

La elevación del terreno se debe proporcionar para cada imagen, y se puede conocer, por ejemplo, a partir de un modelo de elevación digital (DEM).

Se debe seleccionar un modelo atmosférico en función del clima (latitud y época del año). Si la imagen contiene una banda de absorción de agua, FLAASH puede estimar la columna de vapor de agua; de lo contrario el vapor de agua se toma del modelo atmosférico. El modelo de aerosoles debe ser seleccionado dependiendo del tipo esperado de aerosoles presentes. Para sensores con las bandas necesarias, FLAASH puede llevar a cabo la recuperación de aerosol a partir de la imagen. De lo

contrario, se utilizan los valores por defecto del modelo de aerosoles. En cualquier caso, se debe establecer un valor inicial para la visibilidad. En la mayoría de los casos, FLAASH proporciona valores predeterminados para las bandas que utilizarán el vapor de agua y la recuperación de aerosoles, pero en algunos casos debe ser especificado por el usuario (*Rudjord and Due*, 2012. Citado por Renato S., 2015).

Los parámetros requeridos y usados para la corrección atmosférica FLAASH de las imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI (Landsat) son:

- a) Coordenadas geográficas del centro de la escena.
 - Latitud: -13.01998611
 - Longitud: -70.46707778
- b) Tipo de sensor: Multiespectral.
- c) Altura del sensor: 705 km.
- d) Altura sobre el nivel del mar del área de estudio: 0.2 km.
- e) Tamaño del pixel: 30 m.
- f) Fecha de adquisición de la imagen: Se muestra la fecha de cada imagen utilizada en la tabla 3.1, del capítulo 3.
- g) Hora de adquisición de la imagen: Se muestra en el archivo de metadato de cada una de las imágenes.
- h) Modelo atmosférico: Tropical.
- i) Modelo de aerosol: Rural.
- j) Visibilidad: 40 km.

4.2. Cálculo del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El NDVI es calculado a partir de las mediciones de reflectancia del rojo visible e infrarrojo cercano en la región del espectro electromagnético.

El NDVI de las imágenes de los sensores TM y ETM+ se calcula a partir de las bandas 3 y 4 (USGS, 2016a).

$$NDVI_{TM-ETM+} = \frac{\rho(\lambda_{B4}) - \rho(\lambda_{B3})}{\rho(\lambda_{B4}) + \rho(\lambda_{B3})} \quad (4.12)$$

donde $\rho(\lambda_{B4})$ y $\rho(\lambda_{B3})$ son las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el visible, respectivamente.

Para las imágenes del sensor OLI, el NDVI se calcula a partir de las bandas 4 y 5 (USGS, 2016a).

$$NDVI_{OLI} = \frac{\rho(\lambda_{B5}) - \rho(\lambda_{B4})}{\rho(\lambda_{B5}) + \rho(\lambda_{B4})} \quad (4.13)$$

donde $\rho(\lambda_{B5})$ y $\rho(\lambda_{B4})$ son las reflectancias en las bandas del infrarrojo cercano y el rojo visible, respectivamente.

Los valores obtenidos del cálculo del NDVI, fluctúa entre -1 y +1, correspondiendo los valores positivos a superficies con vegetación y suelo desnudo, y los valores negativos a cuerpos de agua y superficies húmedas.

4.3. Obtención del compuesto anual y del mínimo valor Compuesto

El mínimo valor compuesto, es el análisis de los píxeles en el tiempo, y da como resultado los píxeles que tienen menor valor. El compuesto anual, es el promedio de los píxeles en el tiempo. En ambos casos, se utilizaron 23 datos imágenes (MODIS/Terra). Estas imágenes, corresponden a la cantidad de datos que registrar el sensor MODIS durante un año, a un intervalo de tiempo de 16 días. En la figura 4.1, se muestra el análisis de las dos estadísticas.

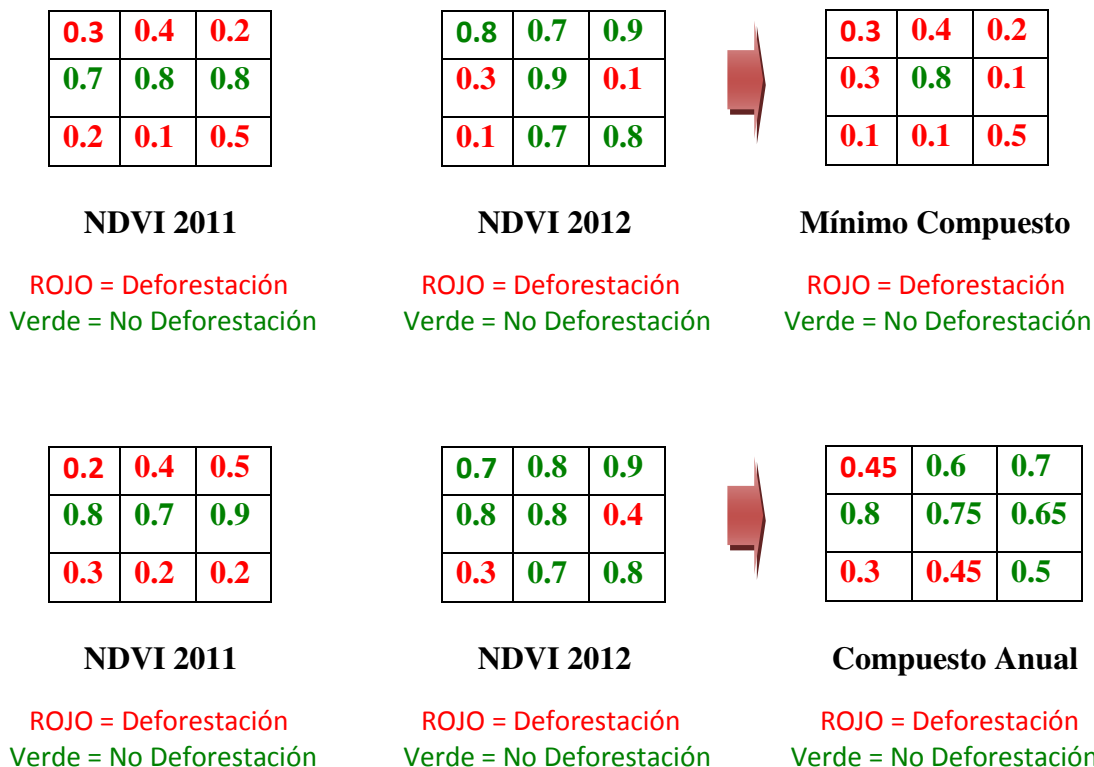


Figura 4.1. Ejemplo de cálculo, del compuesto anual y el mínimo valor compuesto.

4.4. Estimación de la superficie deforestada a partir de imágenes de satélite

La estimación de las superficies deforestadas por minería aurífera, se realizó a partir de imágenes clasificadas mediante el método de segmentación por umbrales. Posteriormente el cálculo de estas áreas clasificadas como minería aurífera, fue realizado con ayuda del software ENVI.

Para ello se utilizó la siguiente ecuación para estimar la superficie deforestada por minería.

$$\textit{Superficie deforestada} = \textit{área del pixel} * \textit{número de píxeles}$$

donde, *área del pixel*, es la resolución espacial (30m x30m) de las imágenes de los sensores TM, ETM+ y OLI (Landsat), equivalente a 900 m² y *número de píxeles*, es la cantidad de píxeles que se encuentran dentro de las áreas segmentadas, clasificadas como superficies deforestadas por minería aurífera.

La estimación de las superficies deforestadas por minería, depende básicamente del número de píxeles obtenidos en la clasificación de las superficies de minería mediante el método de segmentación por umbrales.

Capítulo 5:

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de los datos imágenes de los sensores TM, ETM+, OLI y productos NDVI del sensor MODIS, tales como el compuesto anual de los productos NDVI, análisis de serie de tiempo, análisis de perfiles de elevación, índices de vegetación (NDVI), determinación de umbrales, estimación espacial de la deforestación por minería aurífera y la relación lineal entre el precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación.

5.1. Histograma de los productos NDVI - MODIS

La Figura 5.1, muestra el histograma del NDVI, de la región de interés, obtenidas a partir del compuesto anual de los datos productos NDVI del sensor MODIS, correspondiente a los años 2000, 2010 y 2015.

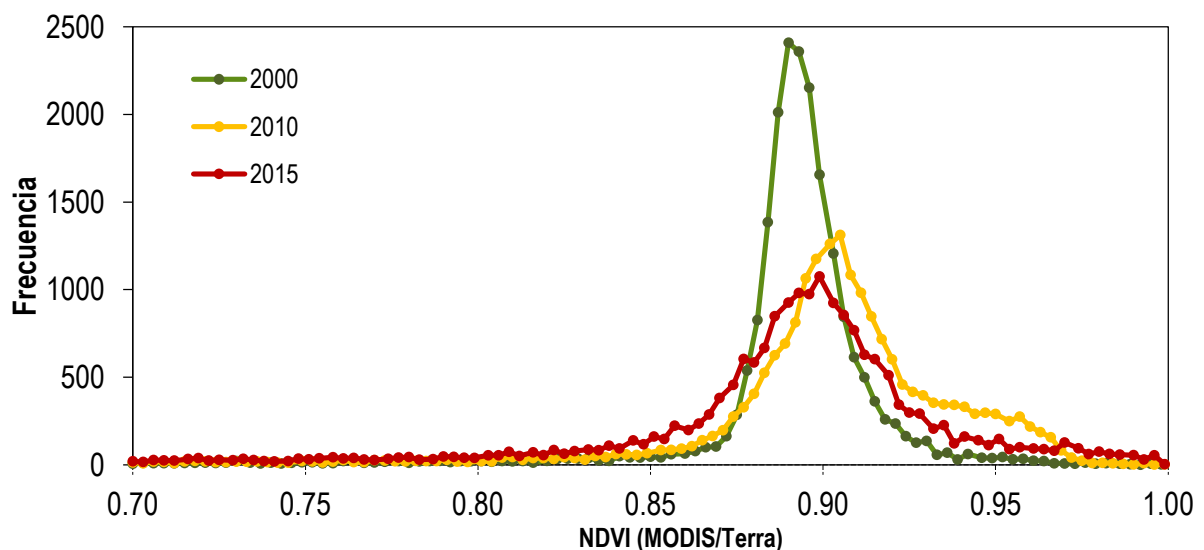


Figura 5.1. Histogramas del compuesto anual de los productos NDVI (MODIS/TERRA).

Los histogramas NDVI – (2010 y 2015), en relación al histograma NDVI – 2000, muestra una disminución de la densidad de pixeles en el intervalo 0.85 - 0.95 del NDVI, lo que indica pérdida de cobertura vegetal en la región de interés.

5.2. Compuesto anual de los datos productos NDVI del sensor MODIS

En la Figura 5.2, se muestran 9 imágenes NDVI del área de estudio. Cada imagen representa el compuesto anual de los productos NDVI del sensor MODIS, durante el periodo 2007 – 2015.

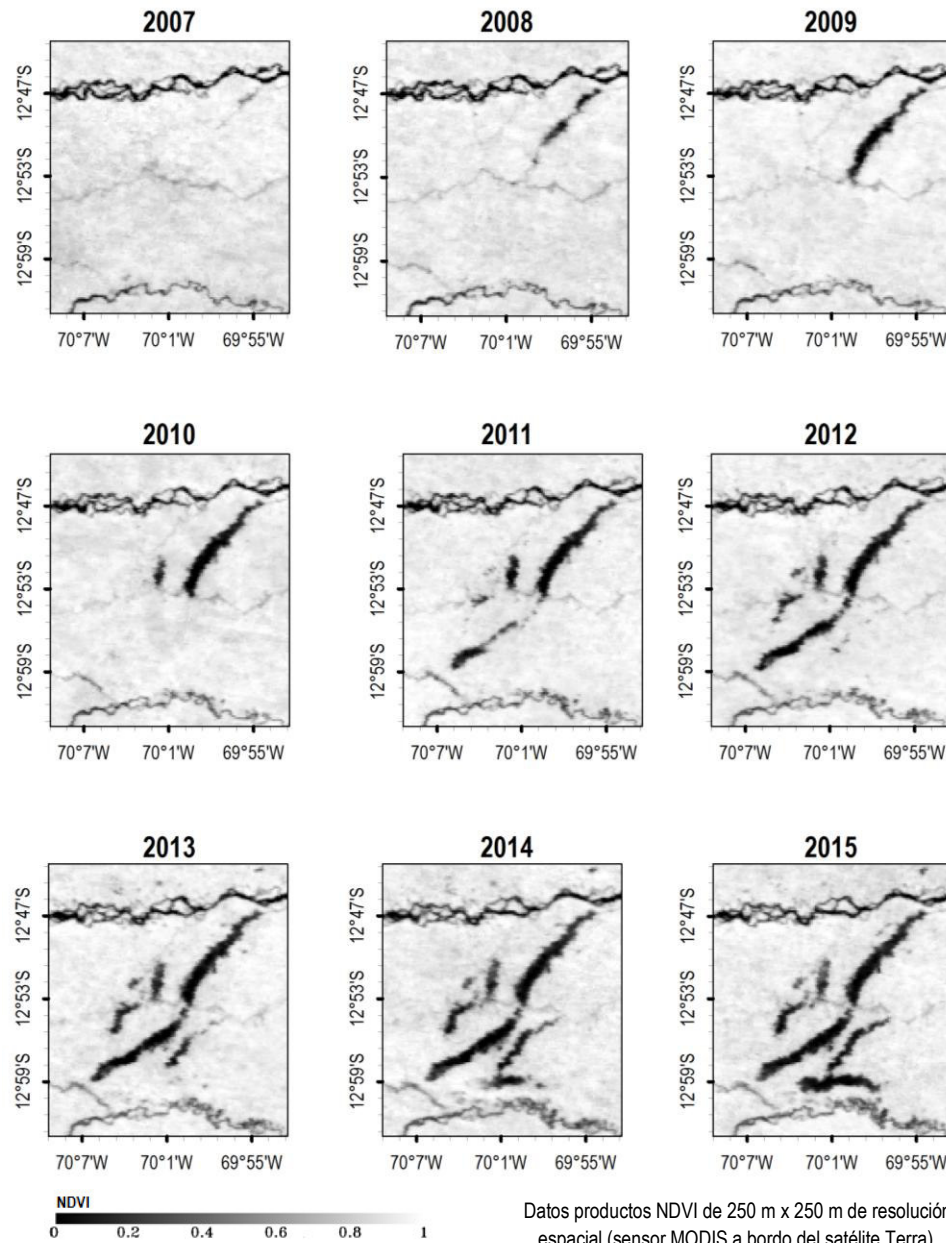


Figura 5.2. Examinación visual de la dinámica de la cobertura vegetal en la Quebrada Guacamayo, a partir del compuesto anual de los datos productos NDVI MODIS/Terra.

5.3. Serie de tiempo del compuesto anual de datos productos NDVI / MODIS

El compuesto anual de los datos productos NDVI - MODIS, fueron analizados espacial y temporalmente durante un periodo de 16 años, comprendidos entre los años 2000 al 2015.

La Figura 5.3, muestra tres pixeles (puntos de color rojo), cada uno representa una zona o muestra representativa para el análisis de las series de tiempo. Se seleccionaron dos zonas dentro de la región gris oscura de la imagen NDVI (zona 2 y zona 3), con el objetivo de conocer el comportamiento del pixel durante un periodo de 16 años. La tercera zona (zona 1) se seleccionó con el fin de mostrar el comportamiento de un pixel que aun no ha presentado perdida de cobertura vegetal. La región gris oscura se extiende diagonalmente en la imagen NDVI, he indica ausencia de vegetación provocada por la deforestación.

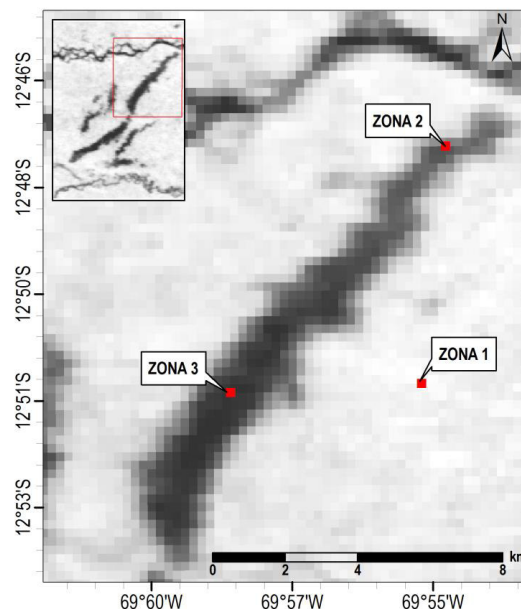


Figura 5.3. Selección de tres zonas para el análisis de serie de tiempo, a partir del compuesto anual del NDVI (año 2014).

La Tabla 5.1, muestra los valores del NDVI de la zona 1, zona 2 y zona 3 durante el periodo 2000 al 2015. Las tres zonas representan el área de un pixel, equivalente a 62,500.00 m², y está identificado con coordenadas de latitud y longitud.

Tabla 5.1. Valores de NDVI de la zona 1, zona 2 y zona3, periodo 2000 al 2015.

COORDENADAS		VALOR DEL NDVI POR AÑO															
Latitud	Longitud	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ZONA 1																	
-12.849	-69.925	0.791	0.794	0.803	0.836	0.818	0.826	0.816	0.846	0.820	0.823	0.819	0.809	0.807	0.855	0.771	0.850
ZONA 2																	
-12.790	-69.916	0.805	0.805	0.827	0.802	0.832	0.858	0.801	0.591	0.298	0.267	0.234	0.245	0.268	0.266	0.251	0.252
ZONA 3																	
-12.849	-69.923	0.795	0.762	0.754	0.827	0.831	0.834	0.816	0.846	0.810	0.300	0.187	0.174	0.175	0.149	0.149	0.166

En la Figura 5.4, se presenta el análisis temporal del compuesto anual del NDVI de las tres zonas seleccionadas, donde se aprecia los cambios drásticos del NDVI y el año de ocurrencia para cada uno de estos cambios de superficie. Para el caso de la zona 1, los valores del NDVI muestran que el área seleccionada para el análisis temporal, no ha sufrido pérdida de la cobertura vegetal durante el periodo 2000 – 2015, debido a que los datos del NDVI en este periodo presentan valores mayores de 0.7. En el caso de la serie de tiempo de la zona 2, se aprecia una caída de los valores del NDVI entre los años 2006 y 2008, esta disminución corresponde a la pérdida de la cobertura vegetal del pixel seleccionado. Por último, en el análisis temporal del NDVI de la zona 3, de igual forma, se aprecia una caída de los valores del NDVI entre los años 2008 y 2009, lo que representa un cambio de superficie, pasando de una región con cobertura vegetal a una región sin vegetación.

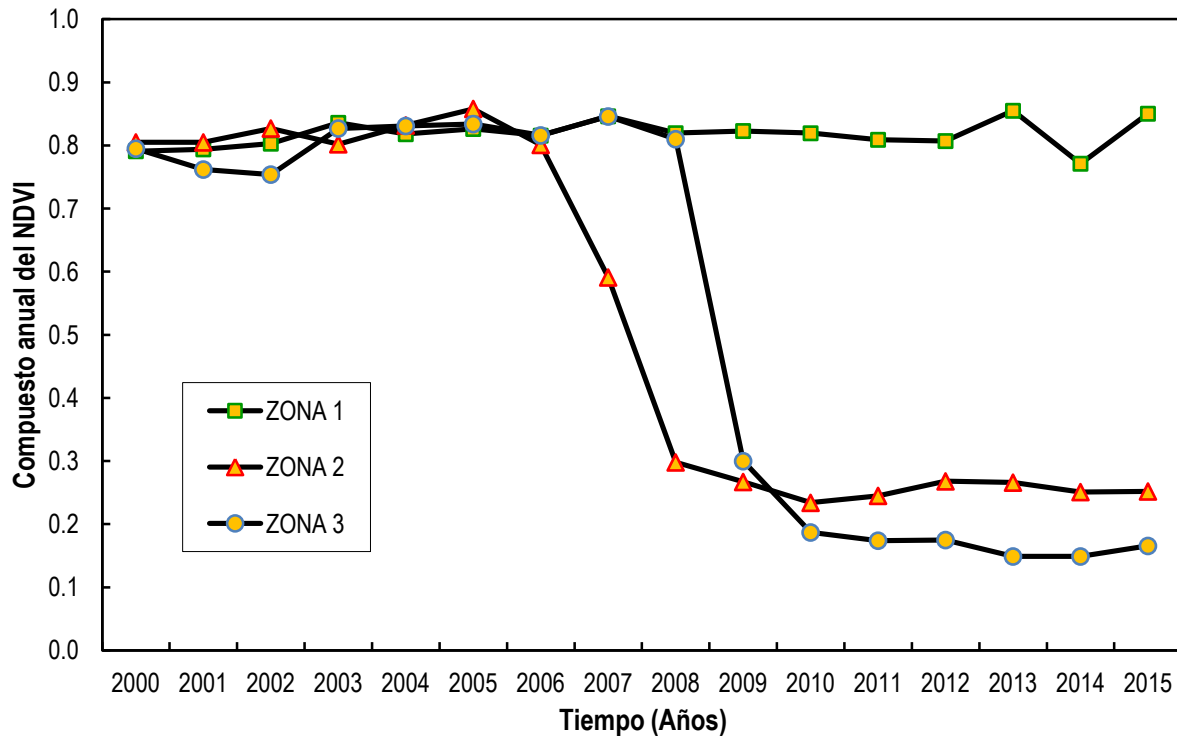


Figura 5.4. Serie de tiempo del NDVI (MODIS/Terra), de las tres zonas de interés en la Quebrada Guacamayo.

Una inspección visual de la serie de tiempo del compuesto anual de los productos NDVI del sensor MODIS/Terra, a una resolución espacial de $250\text{ m} \times 250\text{ m}$, permitió identificar el periodo inicial de la deforestación y el comportamiento de la vegetación a través del tiempo.

5.4. Mínimo Compuesto de datos productos NDVI del sensor MODIS

En la Figura 5.5, se detectan las áreas deforestadas, calculadas a partir del mínimo compuesto de un total de 16 imágenes NDVI. Las imágenes NDVI fueron obtenidas del compuesto anual de los datos productos NDVI del sensor MODIS, durante el periodo 2000 – 2015.

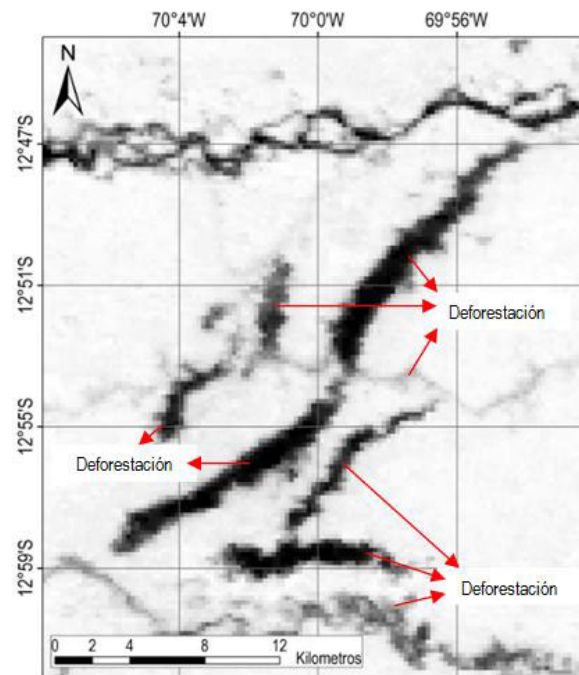


Figura 5.5. Detección de áreas deforestadas a partir del cálculo del mínimo compuesto de 16 imágenes productos NDVI (MODIS/TERRA), correspondiente al periodo 2000 – 2015.

Para una primera fase, el uso de productos NDVI del sensor MODIS, contribuyó a detectar las zonas deforestadas durante el periodo 2000 al 2015, a una resolución espacial de 250 m x 250 m, equivalente a un área de 62,500.00 m² por pixel. Una segunda fase fue posible mediante el análisis de las imágenes Landsat, con resolución espacial de 30 m x 30 m, equivalente a un área de 900.00 m² por pixel. Esta segunda fase se realizó para mejorar el nivel de precisión en la estimación de la cuantificación de las zonas deforestadas por minería aurífera aluvial.

5.5. Modelo de elevación digital (DEM) de la región de estudio

La Figura 5.6, muestra el modelo digital de elevación del distrito de Inambari a una resolución espacial de $30\text{ m} \times 30\text{ m}$. La topografía del área de estudio (recuadro de color rojo) tiene una elevación promedio de 250 m, y no presenta pendientes pronunciadas, provocando que el agua utilizada para la extracción del oro se deposite formando pequeñas lagunas artificiales con alto contenido de sedimentos.

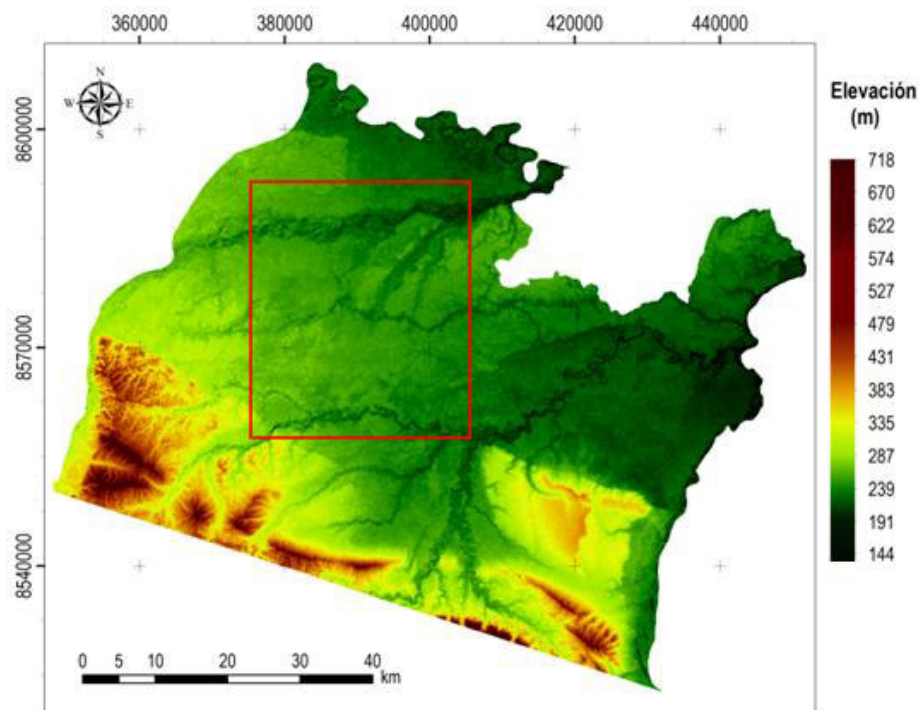


Figura 5.6. Modelo de elevación digital (DEM) del distrito de Inambari. Se muestra la elevación en metros con respecto al nivel del mar.

En la Figura 5.7, se muestra el análisis del perfil de elevación de una región del DEM. En la zona central del perfil de elevación de la gráfica, se aprecia una disminución de los valores de elevación. Este contraste de elevación indica una depresión del terreno, conocida como bosque de terraza baja inundable y son favorables para el desarrollo de la minería aurífera aluvial.

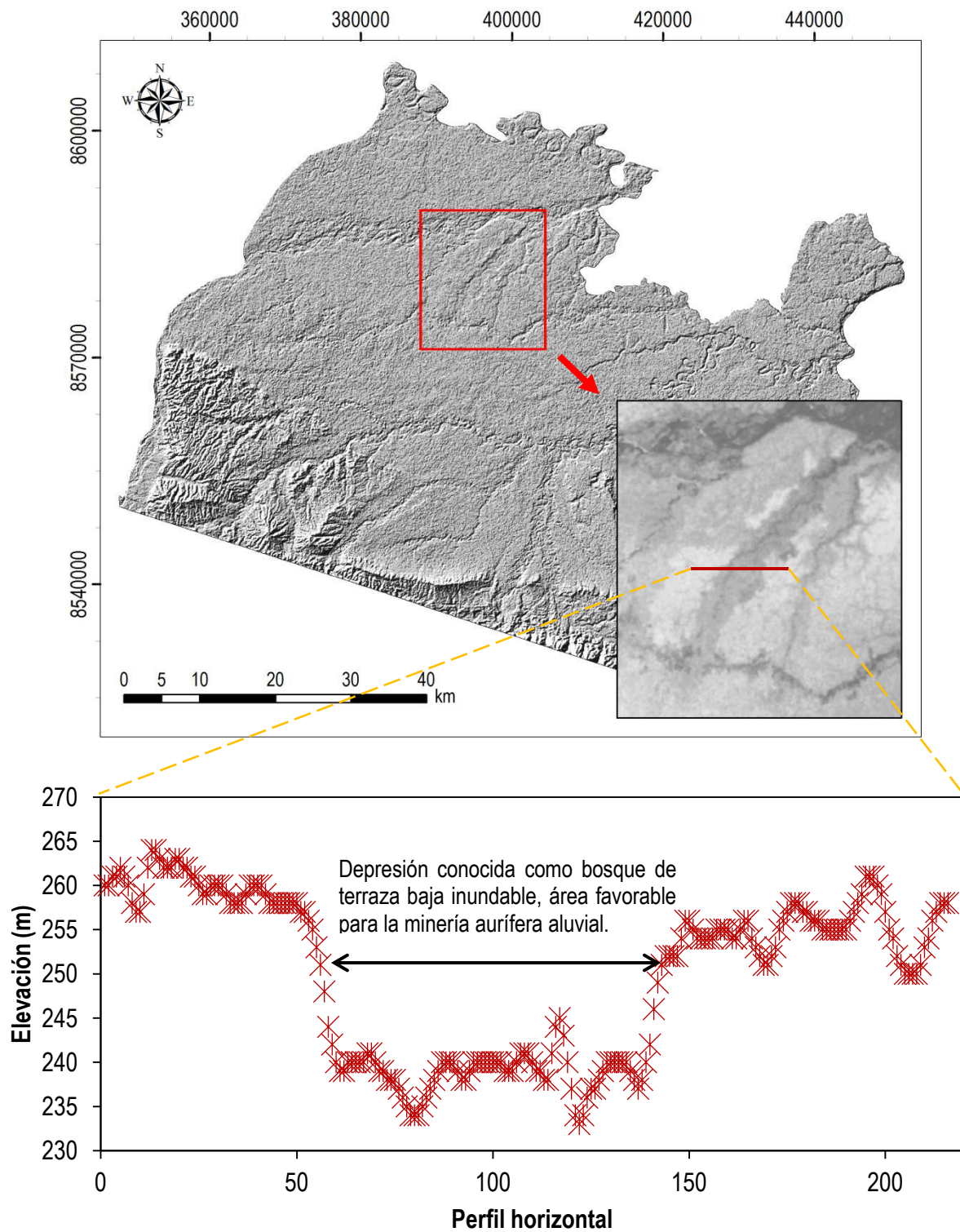


Figura 5.7. Análisis de elevación del perfil horizontal de un sector de la región de interés.

5.6. Combinación RGB de las bandas del sensor OLI.

En la Figura 5.8, se muestra la combinación lineal de tres bandas diferentes. Cada banda es asignada a uno de los tres colores primarios: rojo, verde o azul. En este caso se asignó la banda 7 al color rojo, la banda 5 al color verde y la banda 4 al color azul, RGB: 754.

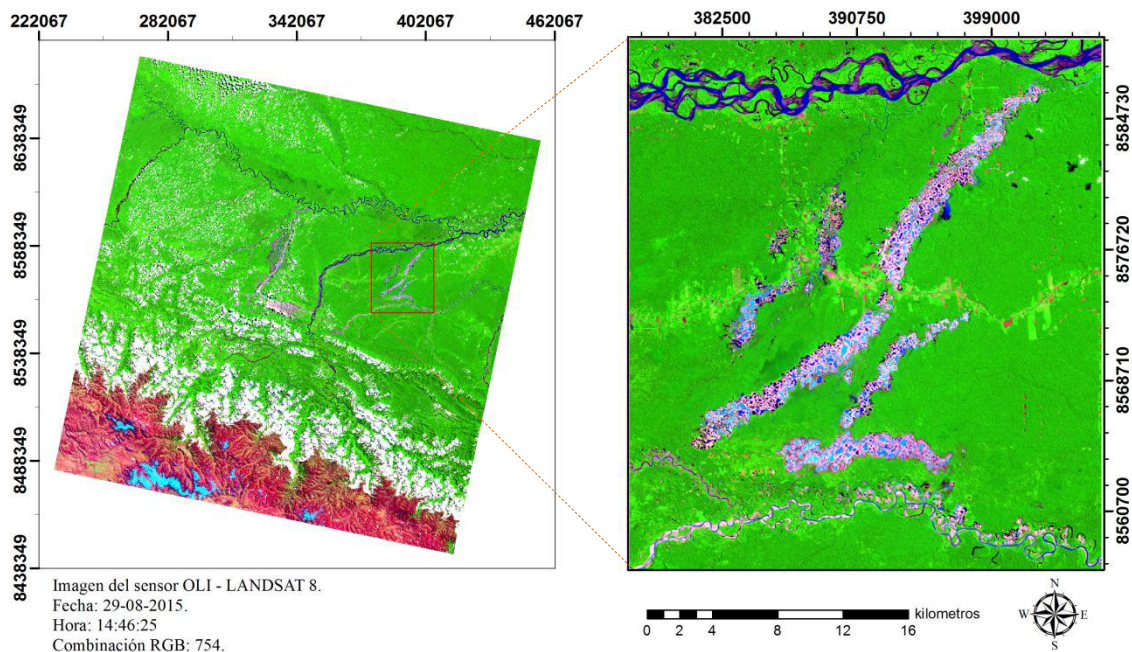


Figura 5.8. Combinación RGB: 754, de la imagen del sensor OLI / Landsat-8 (29-08-2015). En la imagen de la derecha se muestra la región de interés, donde se aprecia los diferentes tipos de superficies.

La combinación RGB: 754, de la Figura 5.8, muestra la cubierta vegetal de color verde y las áreas de minería de un color rosado claro, este contraste de colores resalta la diferencia de superficies y mejora el análisis visual de la imagen. La combinación de bandas es utilizada, para todos los datos imágenes de este trabajo, como un primer análisis visual para identificar los tipos de superficies que componen la región de interés.

5.7. Comportamiento espectral de las superficies que componen el área de interés

La Figura 5.9, muestra la variación de la reflectancia de las superficies que componen la Quebrada Guacamayo en función de la longitud de onda central de cada una de las 6 bandas multispectrales del sensor TM - Landsat 5.

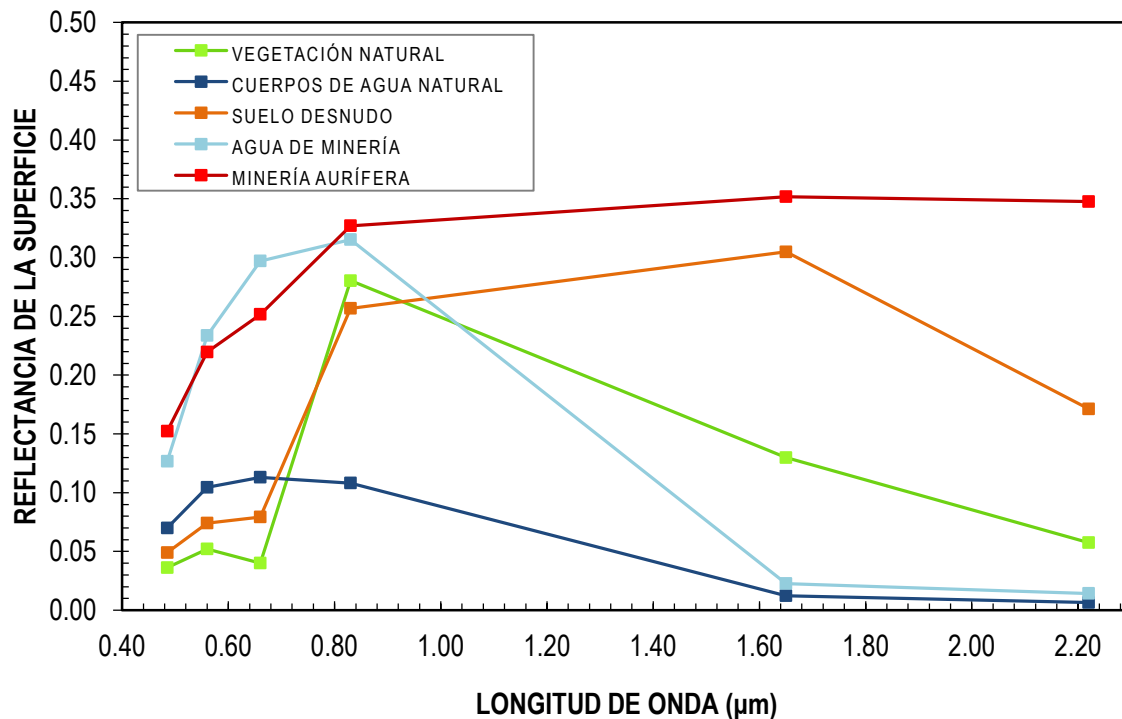


Figura 5.9. Reflectancia de los principales tipos de superficie en la imagen, en función de la Longitud de Onda central. Imagen del sensor TM / Landsat-5 (03/09/11).

La variación de la reflectancia en los píxeles del área de interés, demuestra los diferentes tipos de superficies que la componen. Sin embargo, la reflectancia de los suelos desnudos y las áreas de minería aurífera son similares, principalmente en las regiones del infrarrojo cercano y medio, por lo que al momento de estimar las áreas de minería aurífera es posible incluir píxeles que pertenezcan a la clase de suelo desnudo y no únicamente a minería.

5.8. Distribución espacial y temporal del NDVI de la Quebrada Guacamayo

La Figura 5.10, muestra la distribución de los índices de vegetación en la región de interés, obtenidas a partir de la banda roja e infrarroja cercana de los sensores TM (año: 2007 - 2011), ETM+ (año: 2012 - 2013) y OLI (año: 2014 - 2015). Estas escenas corresponden al periodo 2007 - 2015 y se visualizan en la escala de grises, con valores de pixeles que varían de -1 a 1.

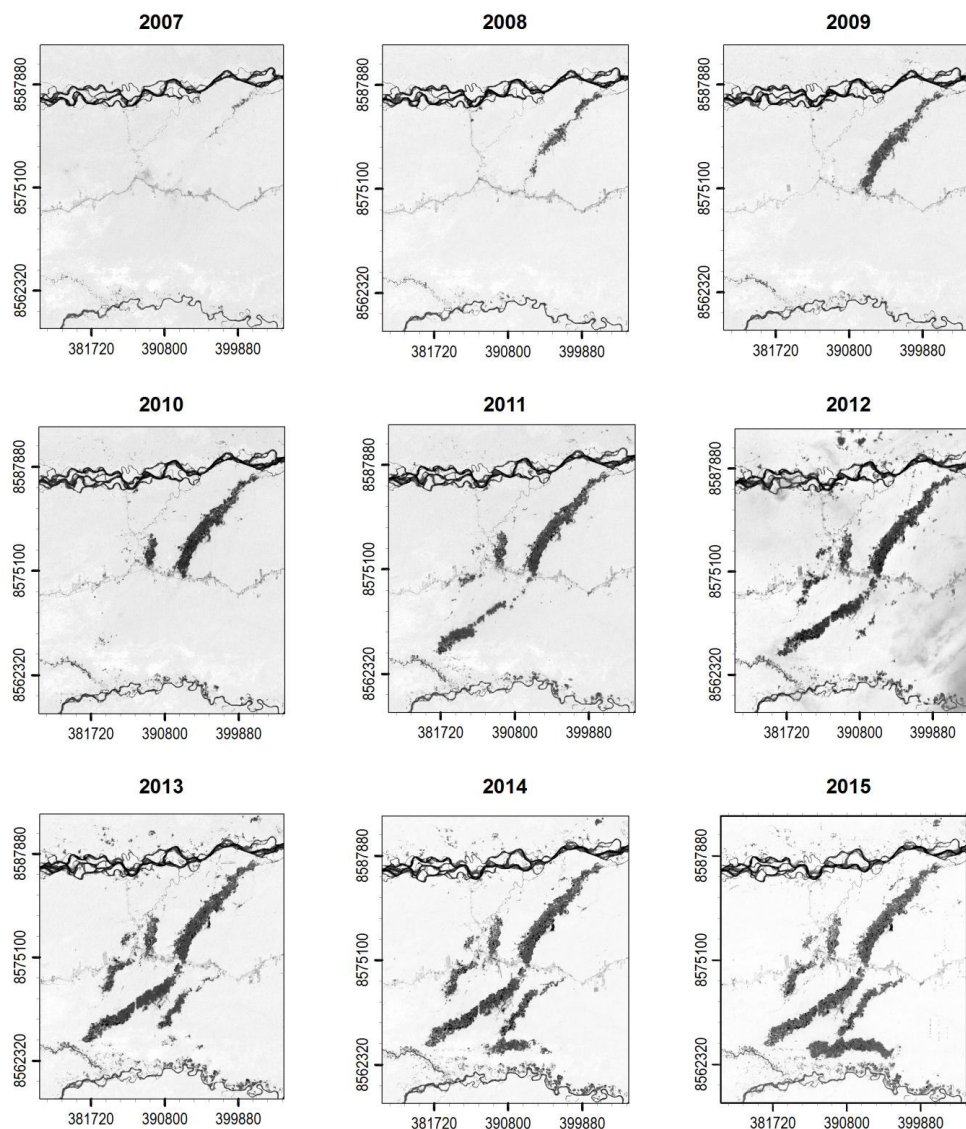


Figura 5.10. Imágenes NDVI de la Quebrada Guacamayo obtenidas a partir de los sensores TM, ETM+ y OLI (periodo 2007–2015).

5.9. Determinación del umbral para la segmentación de áreas mineras

En la Figura 5.11, se muestra la selección de tres zonas sobre la imagen NDVI (recuadros de color rojo). Las tres zonas seleccionadas contienen los principales tipos de superficie que componen la región de interés. La zona 1, contiene cuerpos de agua, bancos de arena y cobertura vegetal; la zona 2, contiene suelos desnudos y cobertura vegetal; finalmente, la zona 3 contiene áreas de minería aurífera, cuerpos de agua con alto contenido de sedimentos y cobertura vegetal. Cada una de estas tres zonas está compuesta por 66 filas y 66 columnas.

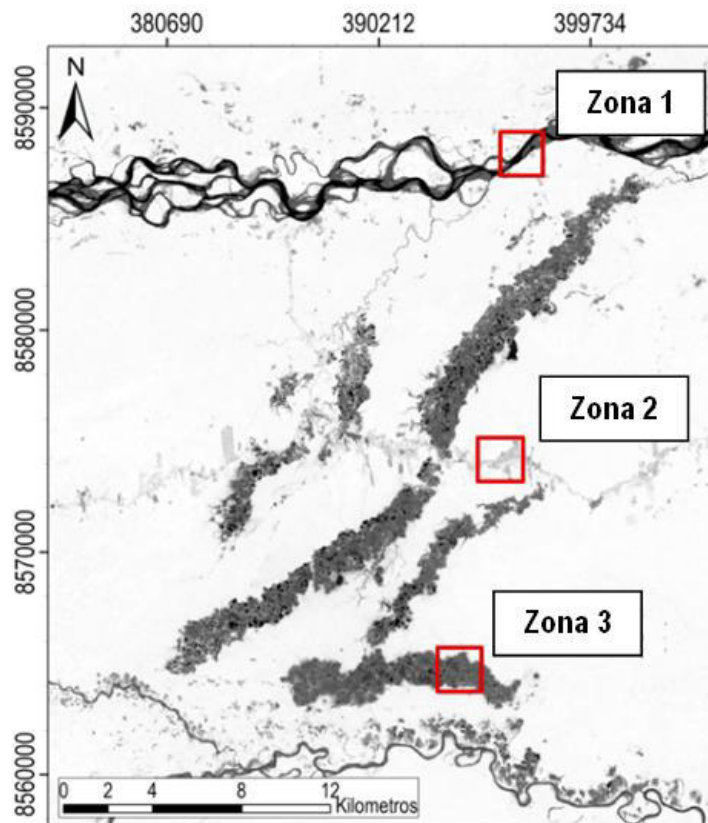


Figura 5.11. Selección de tres zonas que contienen los principales tipos de superficies en la región de interés (Recuadros de color rojo). Imagen NDVI, OLI/Landsat-8 (29/08/2015).

La Figura 5.12, muestra la gráfica de dispersión del NDVI vs perfil horizontal (filas) de las tres zonas descritas (Figura 5.11). Los puntos de color verde forman grupos conglomerados (clúster), cada uno de estos grupos pertenece a una clase de superficie, y según su valor de NDVI promedio se puede identificar a que clase corresponde. En esta figura, se identificó cuatro clases (Cuerpos de agua, minería, suelo desnudo y vegetación). Así mismo los píxeles atípicos o píxeles de frontera que se ubican entre los clúster; cuerpos de agua – minería y minería – suelo desnudo/vegetación, se conocen como zona de transición. Estos píxeles se consideraron como parte de la clase minería, debido a que no son píxeles “puros”, es decir, un porcentaje del píxel corresponde a algún tipo de deforestación, directa o indirectamente proveniente de las actividades de minería aurífera. Estos píxeles no son relevantes en la estimación de las áreas deforestadas por minería.

Considerando que cada grupo conglomerado o clúster se encuentra definido en un intervalo del NDVI. Se tomo el máximo valor del conglomerado *cuerpos de agua* y el menor valor del conglomerado *suelo desnudo*. Luego, para definir los umbrales, se analizaron las firmas espectrales de los píxeles que se ubican en la zona de transición en torno a los máximo y mínimos valores seleccionados. Luego, cuando la firma espectral de los píxeles analizados cambie o tenga mayor similitud a un tipo de superficie en especial, se define un umbral.

Por tanto los umbrales que definen el grupo conglomerado: *minería aurífera*, están delimitadas por la línea horizontal superior de color rojo (< 0.52) y la línea horizontal inferior de color azul (> -0.28).

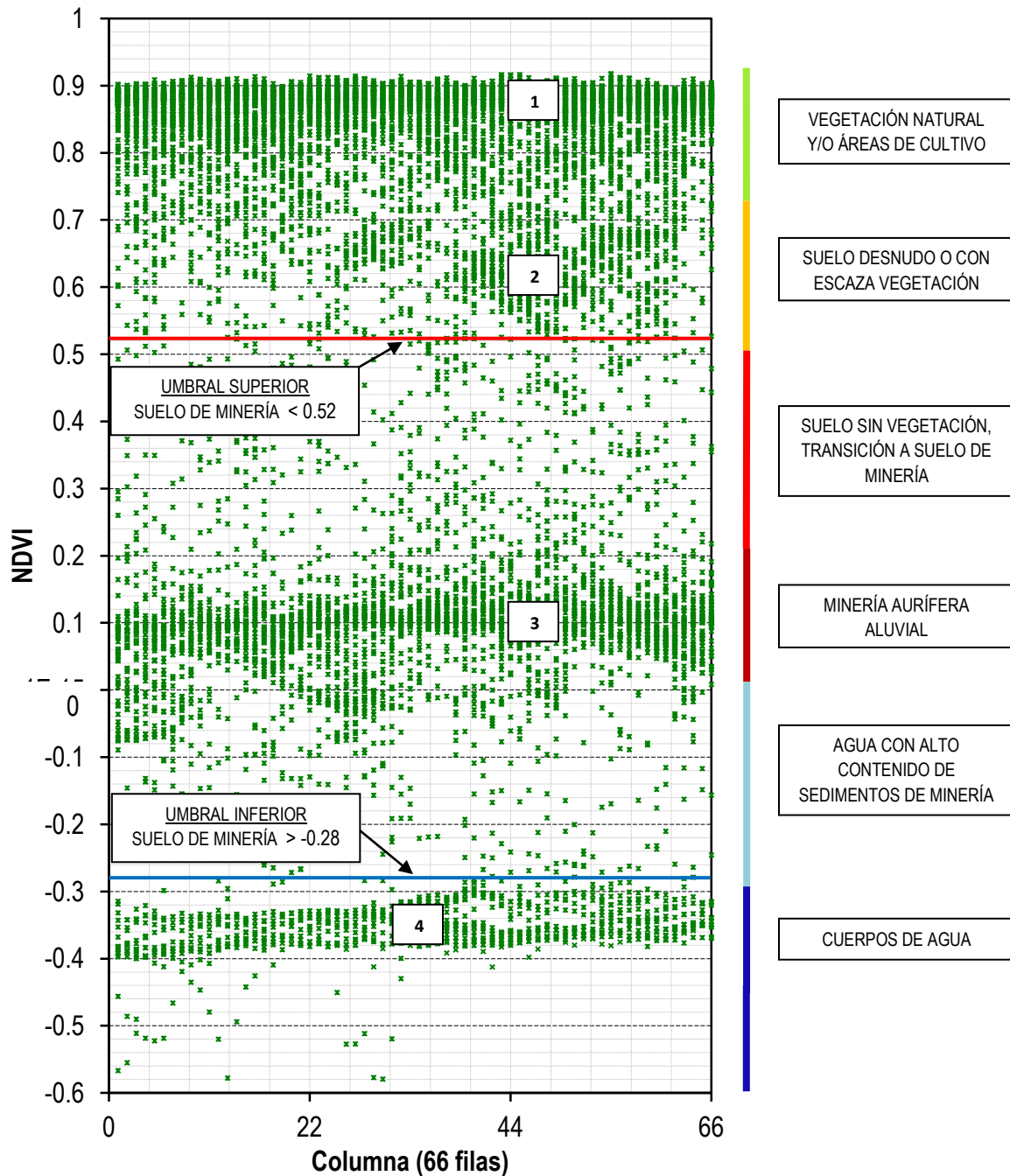


Figura 5.12. Gráfico de dispersión del NDVI vs perfil horizontal de las tres zonas seleccionadas en la imagen NDVI (29-08-2015). Determinación del umbral superior e inferior de las áreas de minería aurífera aluvial.

5.10. Segmentación de áreas de minería, aplicando selección de umbrales

En la Figura 5.13, se muestra de color rojo la evolución espacial de las áreas de minería aurífera durante el periodo 2007 al 2015, realizado mediante el método de segmentación por umbrales a partir de las imágenes NDVI y los umbrales de minería aurífera definidos en la Figura 5.12.

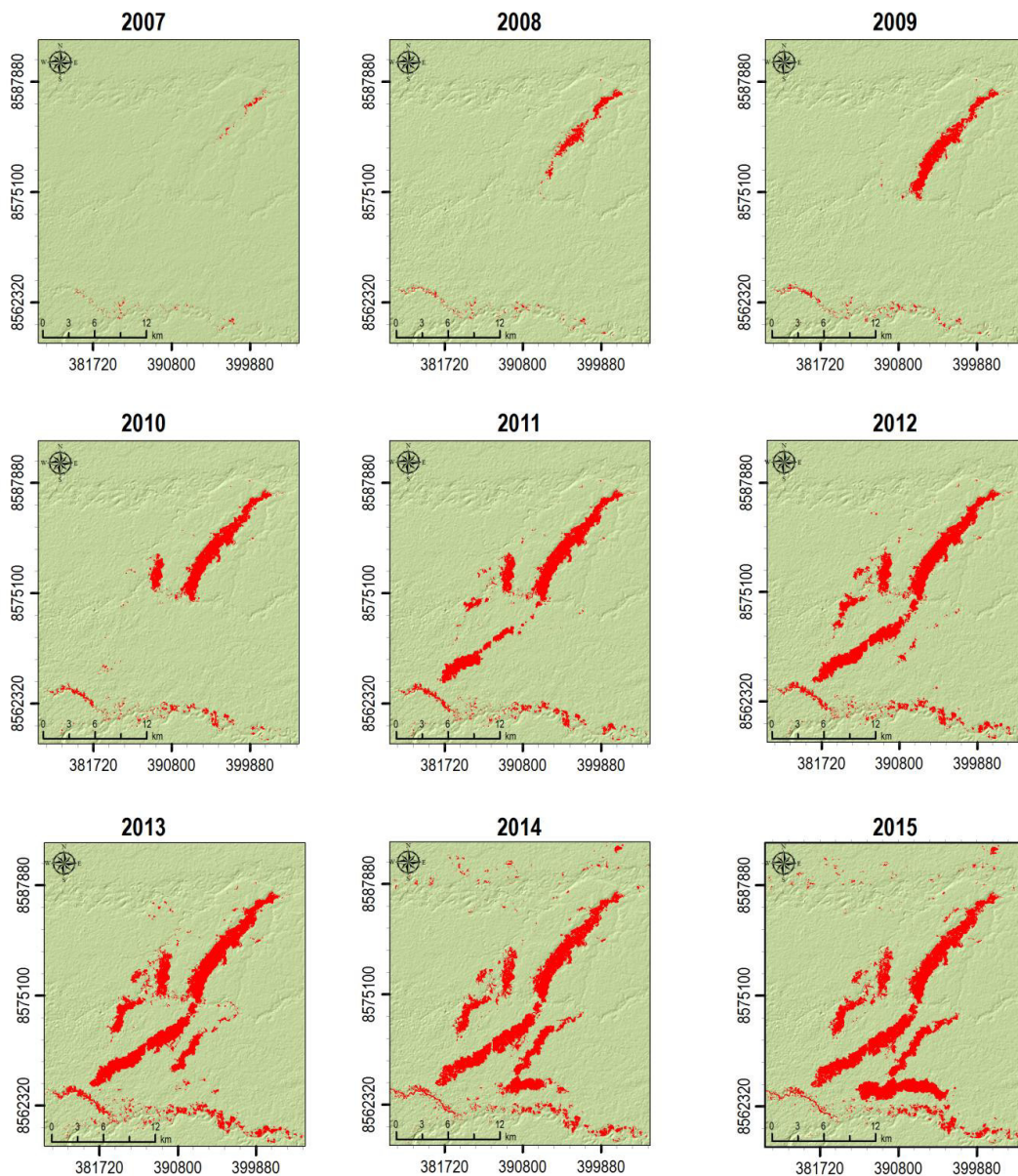


Figura 5.13. Segmentación de la minería aurífera aluvial en la quebrada Guacamayo (área de color rojo), para el periodo 2007 – 2015.

5.11. Cuantificación de áreas deforestadas por minería aurífera aluvial.

En la Figura 5.14, se presentan los gráficos de barras que muestran la acumulación anual de las áreas deforestadas y el incremento de la deforestación, a consecuencia de la minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, durante el periodo 2007 - 2015. En el gráfico de barras de color rojo, se muestra la acumulación anual de las áreas deforestadas por minería, el cual se obtuvo a partir de la información espacial de las segmentaciones realizadas en la Figura 5.13 (Tabla F.1, Anexo F). Estos resultados indican que en el periodo 2007 al 2015, el incremento de las áreas de minería aurífera fue de, $A \approx 9,549$ ha. En el gráfico de barras de color amarillo, se muestra el incremento anual de las áreas deforestadas por minería (Tabla F.2, Anexo F), el cual presenta su máximo valor en el periodo 2011 (1,746 ha), debido, principalmente, al aumento de los precios del oro en este periodo.

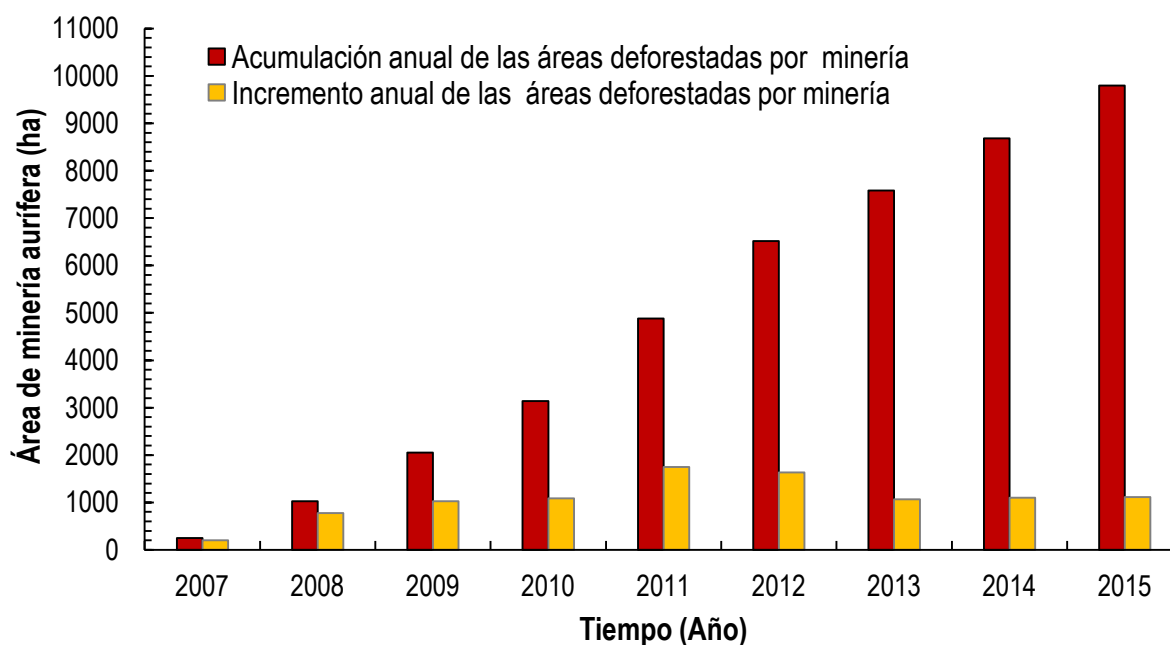


Figura 5.14. Se muestra la acumulación anual de la deforestación en la Quebrada Guacamayo (Barras de color rojo). Incremento anual de las áreas deforestadas por minería (Barras de color amarillo).

En la Figura 5.15, se presenta la línea de tendencia obtenida a partir de los datos de la estimación anual de las áreas deforestadas por minería aurífera, durante el periodo 2007 - 2015. La ecuación es lineal y presenta un RMSE=277 ha.

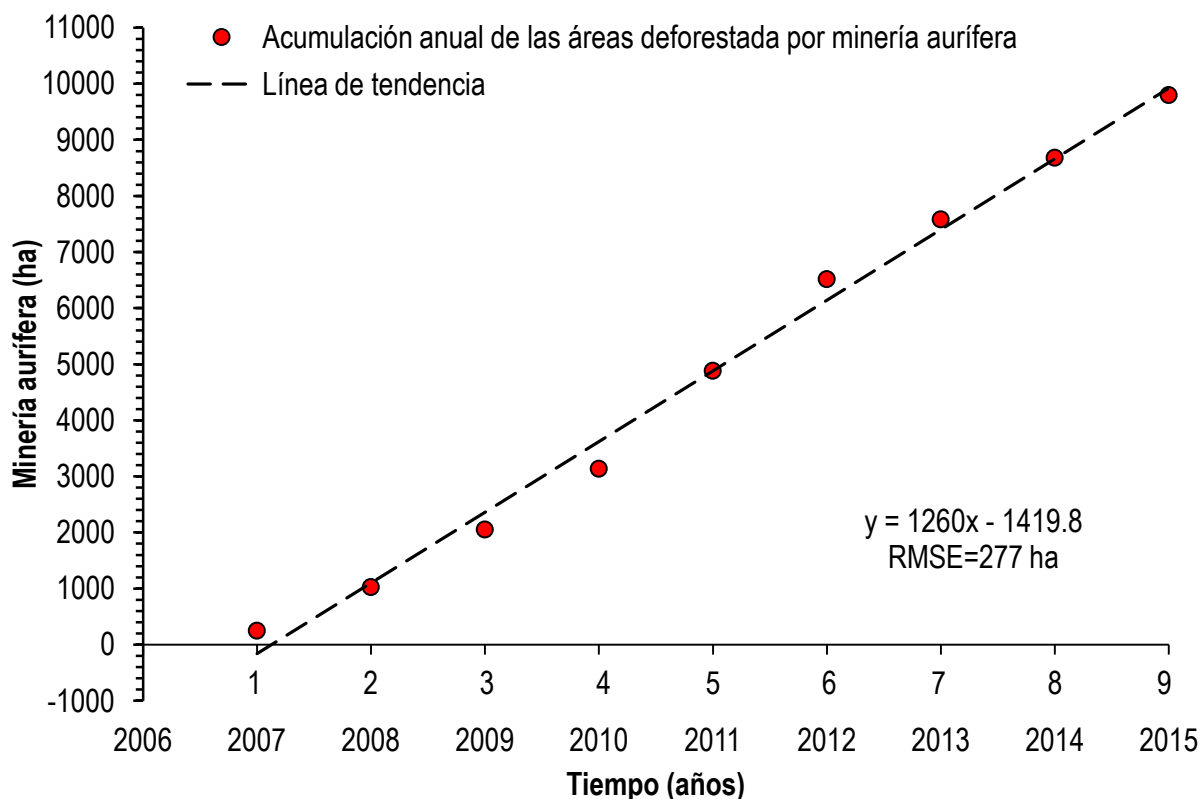


Figura 5.15. Tendencia o regresión lineal de la deforestación anual acumulada por minería aurífera en la quebrada Guacamayo, periodo 2007 – 2015.

La deforestación por minería aurífera en la region de Guacamayo, presenta una tendencia linea creciente, tal y como se muestra en la Figura 5.15. Esta gráfica evidencia el incremento de la deforestación de bastas áreas de vegetación natural, a consecuencia de la minería aurífera aluvial.

En la ecuación de la recta, que se muestra en la figura 5.15, la pendiente representa la tasa promedio anual de la deforestación por minería aurífera, $T=1,260$ ha/año.

5.12. Precio del oro y su relación con el incremento de la deforestación por minería aurífera a través del tiempo

En la Figura 5.16, se muestra la variación mensual del precio del oro (Tabla E.1, Anexo E), conjuntamente con el incremento anual de las áreas deforestadas por minería. Se aprecia que ambas gráficas siguen variaciones similares, lo que evidencia la relación que existe entre el precio del oro y la actividad minera en la region de interes.

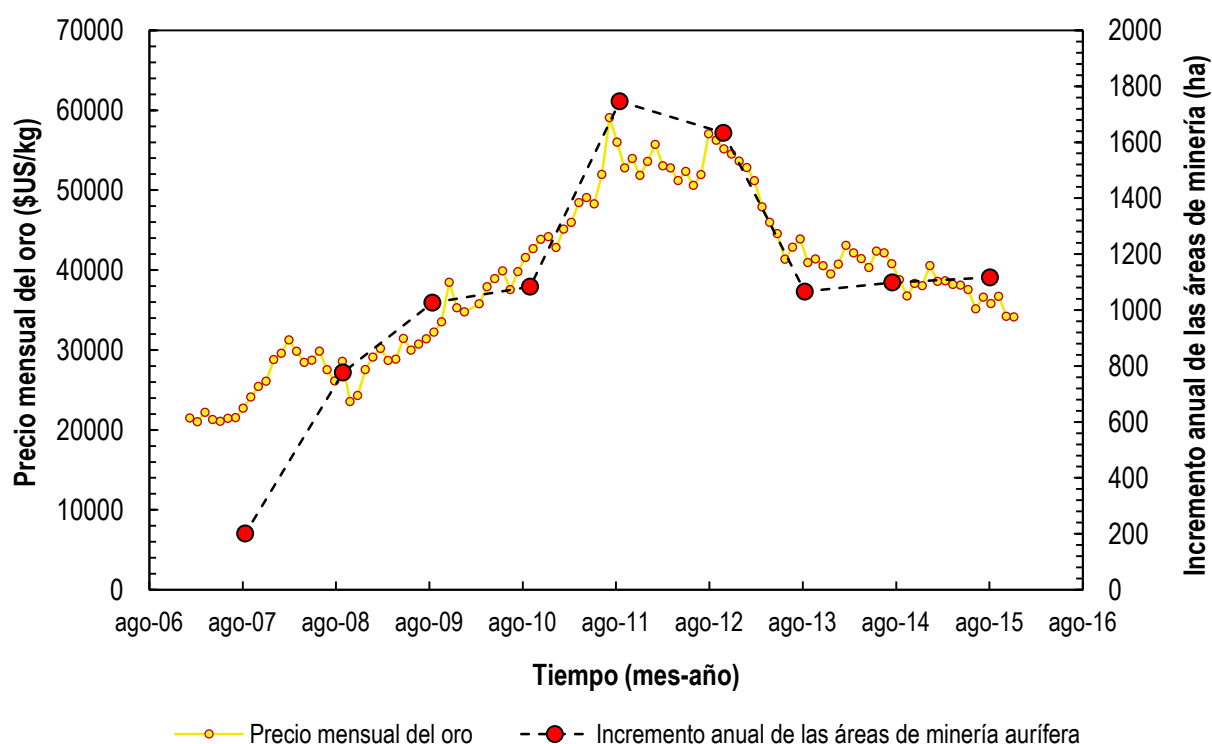


Figura 5.16. Precio del oro y áreas deforestadas por minería aurífera a través del tiempo.

En la Figura 5.17, se aplica regresión lineal a los datos del precio promedio anual del oro vs el incremento anual de deforestación por minería, con el objetivo de mostrar la correlación que existe entre ambos datos.

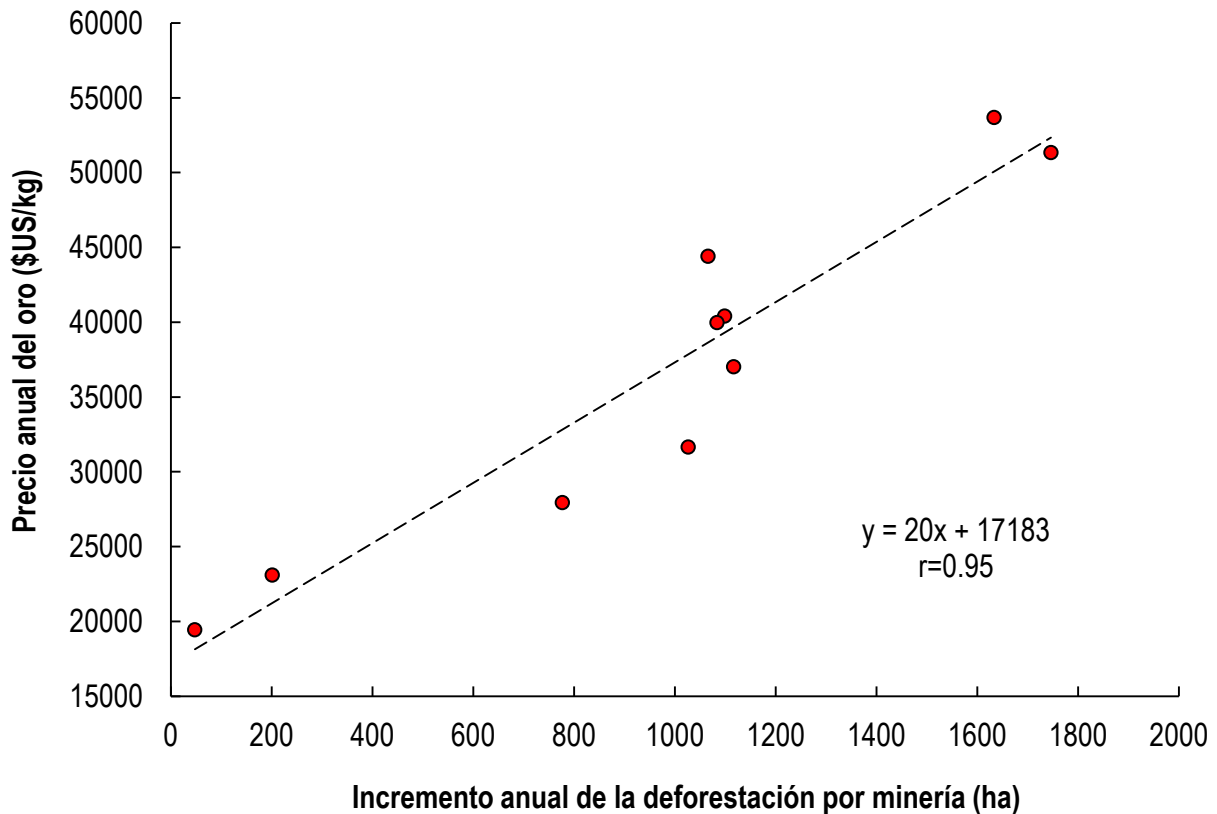


Figura 5.17. Regresión lineal de los datos del precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería en la Quebrada Guacamayo, durante el periodo 2006 – 2015.

En la gráfica de la Figura 5.17, el coeficiente de correlación de Pearson es igual a $r=0.95$, lo que representa una correlación positiva muy alta, entre el precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería aurífera.

Capítulo 6:

Conclusiones

6.1. Conclusiones

Los resultados presentados demuestran que la metodología empleada cumplió con los objetivos de detectar, identificar y cuantificar las áreas deforestadas a causa de la minería aurífera aluvial en la Quebrada Guacamayo, mediante el uso de los productos MOD13Q1-NDVI del sensor MODIS e imágenes de los sensores TM (Landsat-5), ETM+ (Landsat-7) y OLI (Landsat-8) durante el periodo 2006 al 2015.

Los histogramas de los productos NDVI del sensor MODIS, fueron analizados en tres periodos distintos (2000, 2010 y 2015), y permitieron detectar sobre el área en estudio, la pérdida progresiva de la superficie vegetal.

El análisis temporal del NDVI (MODIS/Terra) en tres zonas de la imagen (62,500 m², equivalente a un pixel de 250 m x 250 m), permitió identificar la fecha de inicio de la deforestación y la tendencia de estas áreas afectadas. Así mismo el compuesto anual de estas imágenes NDVI, durante el periodo 2007 – 2015, mostraron visualmente la variabilidad espacial de las áreas de minería.

Las superficies de minería, bancos de arena (rivera de los ríos) y suelos desnudos presentaron firmas espectrales similares. Esta similitud espectral, puede conllevar a pequeños errores de segmentación al momento de estimar las áreas deforestadas por minería aurífera.

Las áreas de minería aurífera en esta región de Madre de Dios, se ha incrementado progresivamente a una tasa promedio anual de 1,260 ha/año, lo que representa un peligro para el ecosistema.

La variación del precio promedio anual del oro y el incremento anual de la deforestación por minería aurífera, presentó un coeficiente de correlación de pearson de $r=0.95$. Este resultado representa una correlación positiva muy alta, lo que demuestra la relación lineal que existe entre ambas variables.

Los resultados de este trabajo permiten hacer una evaluación multi-temporal del avance de las actividades mineras en la zona de la Quebrada Guacamayo, contribuyendo con información necesaria para los agentes tomadores de decisiones.

La Teledetección es una herramienta fundamental para el estudio y seguimiento de la deforestación provocada por la minería aurífera aluvial, la cual proporciona información de la variabilidad espacial y temporal de estas áreas.

Este trabajo de tesis no cuenta con datos de campo para la validación de los resultados. La validación queda pendiente para trabajos posteriores.

Referencias

1. Abrams, M. & Hook, S. (1998). ASTER User Handbook. Version 1, NASA/Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.pp.13-26.
2. Adler, G., Matthew, Bernstein, L., Levine, R., Berk, A., Richtsmeier, C., Acharya, P., Anderson, G., Felde, G., Gardner, J., Hoke, M., Jeong, L., Pukall, P., Ratkowski, A., & Burke, H., (1999). Atmospheric Correction for Short-waveSpectral Imagery Based on MODTRAN4. SPIE Proceedings on Imaging Spectrometry, Vol.3753, pp. 61-69.
3. Aguilar, H., Mora, R. & Vargas, C. (2014). Atmospheric correction methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module software. Revista Geográfica de América Central, N° 53, ISSN 1011-48X, pp. 39-59.
4. Asner G., Páez G., Knapp D., Balaji A. y Clark J. (2009). Sistema Amigable de Monitoreo de la Deforestación y Perturbación de Bosques Tropicales CLASlite®. Guía del usuario, versión 2.0. Departamento de Ecología Global. Institución Carnegie para la Ciencia. 260 Panama Street, Stanford, CA 94305 USA.
5. Badaracco, R. (2012). Detección de la Salinidad en los Suelos de Cultivos de Algodón usando Imágenes de Satélite en la Costa Norte del Perú (tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
6. Bannari, A., Morin, D. & Bonn, F. (1995). A review of vegetation indices. Remote Sensing Reviews, 13, pp. 95-120.
7. Chander G., Markham B. & Helder D. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote sensing of environment 113, p. 893-903.

8. Chander, G., Markham, B. L., & Barsi, J. A. (2007). Revised Landsat 5 Thematic Mapper radiometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 490–494.
9. Chander, G. & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 41, Nº 11, p. 2674-2676.
10. Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (2nd ed., pp. 46 - 84). Madrid, España: Ediciones Rialp S.A.
11. Colditz, R. (2007). *Time Series Generation and Classification of MODIS Data for Land Cover Mapping. TESIS DOCTORAL. Universidad de Würzburg. Würzburg – Germany.*
12. Edwards, A. J. (1998). Lesson 3: Radiometric correction of satellite images: when and why radiometric correction is necessary. Disponible de <http://www.ncl.ac.uk/tcmweb/bilko/module7/lesson3.pdf>.
13. Frulla, L. (1992). *Perturbaciones introducidas por la atmósfera y la superficie terrestre en las bandas ópticas de la radiación electromagnética solar. Su importancia en la teledetección. Tesis doctoral, Dto. De Física de la UBA, Argentina.*
14. Fujisada, H. B. (2005). ASTER DEM performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, (43): 2707-2714.
15. Gandía, S. & Meliá, J. (1991), *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales: recursos renovables, agricultura. Universidad de valencia, España.*

16. Gao B. & Goetz, A. F. H., (1990). Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data: Journal of Geophysical Research, v. 95, no. D4, p. 3549-3564.
17. Heck, C. & Ipenza, C. (2014). Análisis comparativo de la situación de la minería ilegal en seis países amazónicos. Sociedad Peruana de Derecho Ambiental, Lima, Perú.
18. Hernández, J. Montaner, D. (2009). *Patrones de Respuesta espectral*. Laboratorio de Geomática y Ecología del Paisaje (GEP) – Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile.
19. Huesca, M. (2009). Utilidad del índice espectral as1 para caracterizar tipos de vegetación en zonas bioclimáticas distintas mediante análisis de series de tiempo. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII congreso de la Asociación Española de Teledetección, pp. 561 – 564.
20. Karszenbaum, H. (2005). Protocolo procesamiento de imágenes satelitales Landsat. SIB. Buenos Aires, Argentina. 1 p.
21. Kruse, F.A. (2004). *Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO*. Recuperado de: http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004_ATM_Compare.pdf.
22. Kuramoto, J. (2001). Artisanal and Mining in Perú. Mining, Minerals and Sustainable Development – MMSD, (82), p. 4.
23. Lenoble, J. (1993). Atmospheric Radiative Transfer, A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia, USA, pp. 530-535.
24. Lira, J. & Oliver, A. (1983). A diffusion model to correct multi-spectral images for the path—radiance atmospheric effect. Mexico D.F. pp.55-57.

25. Llactayo, W., Victoria, E., Salcedo, K., Marchand, G., Montero, A., García, W. & Sauñe, A. (2015). Cuantificación y análisis de la deforestación en la Amazonía Peruana en el periodo 2010-2011-2013-2014. Dirección General de Ordenamiento Territorial, Ministerio del Ambiente, Lima, Perú.
26. Maskova, Z., Zemek, F. & Kvet, J. (2008). Normalized difference vegetation index (NDVI) in the management of mountain meadows. *Boreal Env. Res.* 13: 417-432.
27. Matthew, M.W., S.M. Adler-Golden, A., Berk, S.C. Richtsmeier, R.Y. Levine, L.S. Bernstein, P.K. Acharya, G.P. Anderson, G.W. Felde, M.P. Hoke, A. Ratkowski, H.-H. Burke, R.D. Kaiser, & D.P. Miller, (2000). Status of Atmospheric Correction Using a MODTRAN4-based Algorithm. *SPIE Proceeding, Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI*, Vol. 4049, pp. 199-207.
28. MODIS (2016). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. Consultado el 25 de ago. 2016. Disponible de: <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
29. Moreno, R. (2013). Cálculo de la tasa de deforestación anual en el periodo 2001-2011 en la provincia de Tambopata con imágenes de NDVI (MOD13) de MODIS, mediante relación de ajuste de recta. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil. pp. 1346 – 1354.
30. Moschella, P. (2011). Impactos ambientales de la minería aurífera y percepción local en la microcuenca Huacamayo, Madre de Dios (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

31. Oñate-Valdivieso F. & Bosque J. (2007). Extracción de modelos digitales de elevación a partir de imágenes ASTER para la determinación de características morfométricas de cuencas hidrográficas. Ed. Martin, 457- 464.
32. Pérez, C. & Muñoz, A. (2006). Teledetección: Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca, Salamanca, España.
33. Pérez, J. (2007), Introducción a los Sensores Remotos-Aplicaciones en Geología. Laboratorio de Tectónica Andina, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, C1428EGA, Buenos Aires, Argentina.pp.27-30.
34. Rahman, H & Dedieu, G. (1994). SMAC: A simplified method for the atmospheric of satellite measurements in the solar spectrum. International Journal of Remote Sensing, vol 15, pp.123-143.
35. Renato, S. (2015). Identificación de tierras degradadas por salinidad del suelo en los cultivos de caña de azúcar en Pomalca usando imágenes de satélite. (tesis para optar el grado de Magister), Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
36. Romero, M., Pachas, V., Zambrano, G. & Guarniz, Y. (2005). Formalización de la minería en pequeña escala en América Latina y el Caribe: Un análisis de experiencias en el Perú. CooperAcción, Acción solidaria para el desarrollo, Lima, Perú.
37. Rouse, J., Hass, R., Shell, J. & Deering, D. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Fraden S. C., Marcanti E. P. & Becker M. A. (eds), Third ERTS-1 Symposium, 10-14 Dec. 1973, NASA SP-351, Washington D.C. NASA, pp. 309-317.

38. Silva, A. (2014). Analysis of vegetation dynamics using time-series vegetation index data from Earth Observation Satellites. (Tese de Doutorado). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Brasil.
39. Slater, P.N. (1980). Remote Sensing: Optics and Optical Systems. Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, pp.575.
40. Smith, J. A., Tzeu L. L., & Ranson, K. J. (1980). The Lambertian Assumption and Landsat Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 46 (9), pp.1183-1189.
41. Sobrino, J. A. (Ed.) (2000). Teledetección: Servicios de publicaciones, Universidad de Valencia, España.
42. Spiegel, M. (1992). Teoría de la correlación. En ESTADÍSTICA (págs.322 - 356). México D.F.: Mc GRAW-HILL.
43. Swenson, J., Carter, C., Domec, J-C, & Delgado, C. (2011). Gold Mining in the Peruvian Amazon: Global Prices, Deforestation, and Mercury Imports. PLoS ONE 6(4): e18875. doi:10.1371/journal.pone.0018875.
44. Toutin, T. (2008). ASTER DEMs for geometric and geoscientific applications: A review. Int. J. Remote Sens., Vol.29, No.7, pp.1855-1875.
45. USGS (2016a). Landsat Missions. Consultado el 10 de set. de 2016. Disponible de: <https://landsat.usgs.gov/>.
46. USGS (2016b). Landsat 8 (L8): Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Version 2.0, LSDS-1574.

47. Williams, D. (2004). Landsat-7 Science Data User's Handbook, Acquired http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html (fecha de acceso 2009), National Aeronautics and Space Administration.
48. Yagüe, J. (2000). Una serie multitemporal de 87 NDVI-MVC sobre Castilla y León. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 397-415.

Anexos

ANEXO A

A.1. Términos y unidades de medida

A continuación se presenta los conceptos básicos de las unidades de medida utilizadas en este trabajo de tesis.

Energía radiante (Q): Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J).

Densidad radiante (W): Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cubico (J/m^3).

$$W = dQ/dv \quad (A.1)$$

Flujo radiante (ϕ): Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios ($W = J/s$).

$$\phi = dQ/dt \quad (A.2)$$

Emitancia radiante (M): Total de energía radiada en todas las direcciones desde una unidad de área S , y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

$$M = d\phi/dS \quad (A.3)$$

Irradiancia radiante (E): Total de energía radiada sobre una unidad de área y por unidad de tiempo (W/m^2).

$$E = d\phi/dS \quad (A.4)$$

Intensidad radiante (I): Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la selección completa de la energía transmitida, y se mide en estéreo – radianes. Por tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estéreo – radian (W/sr).

$$I = d\phi/d\Omega \quad (A.5)$$

Radiancia (L): Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección.

$$L = \frac{dI}{dS \cos \theta} = \frac{d\phi}{d\Omega dS \cos \theta} \quad (A.6)$$

Radiancia espectral (L_λ): Indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota.

$$L_\lambda = dL/d\lambda \quad (A.7)$$

Radiancia directa (L_{pix}): La radiancia directa es aquella que llega a los detectores sin sufrir desviaciones con respecto a la dirección inicial, esta también llamada radiancia del pixel.

Radiancia directa proveniente de la atmósfera (L_{atm}): Hace referencia a aquellos haces de luz que se encuentran atrapados en la atmósfera y de alguna forma radian en dirección del campo del sensor, esta radiancia directa proveniente de la atmosfera contribuye con información adicional que puede considerarse como error en la señal captada por el sensor (Frulla L., 1992).

Radiancia proveniente del medio ambiente (L_{env}): Se refiere a la radiación que es emitida por zonas vecinas al pixel observado en un instante de tiempo, muchos algoritmos de corrección atmosférica acostumbran corregir este efecto a través de filtros que teóricamente atenúan o resaltan el efecto de adyacencia (Frulla L., 1992).

Al igual que en irradiancia la superposición de estas tres componentes da como resultado la radiancia total medida por el sensor y está notada por:

$$L_{sensor} = L_{pix} + L_{atm} + L_{env} \quad (A.8)$$

Ángulo cenital solar (θ): El ángulo cenital solar, altitud del sol o ángulo de elevación solar, son ángulos complementarios que describen la posición del sol con relación al zenit, respectivamente. La posición del sol es un factor en la cantidad de radiación atmosférica incidente presente, de la cantidad de irradiancia en el terreno y radiancia atmosférica tipo “upwelling” detectada por el sensor (Figura A.1).

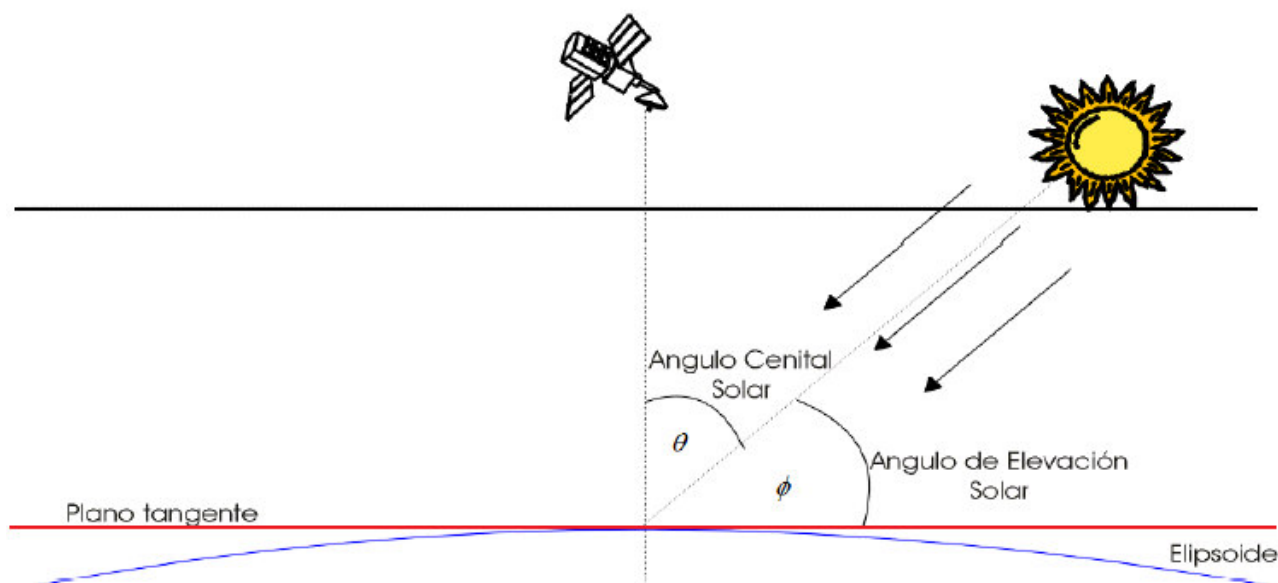


Figura A.1. Ángulo cenital solar (Slater, 1980)

Emisores Lambertianos ($E(\theta)$): Cualquier superficie, real o imaginaria, cuya radiancia sea independiente de la dirección considerada se denomina emisor(o radiador), Lambertianos puesto que verifica la ley de Lambert del Coseno: la irradiancia (o Emitancia) desde un elemento cualquiera de área sobre la superficie varía como el coseno del ángulo entre la dirección de la normal a la superficie.

$$E(\theta) = E(0) \cos \theta \quad (A.9)$$

Distancia Tierra – Sol (d): Esta distancia varía con la posición de la Tierra en la elíptica para un instante de tiempo (Tabla B.1). Se muestra que para valores de 0° en el ángulo α , la Tierra se encuentra en la posición más cercana al Sol llamada perihelio; cuando α es igual a 180° la Tierra se encuentra en la posición más distante al Sol, denominada afelio (Figura A.2).

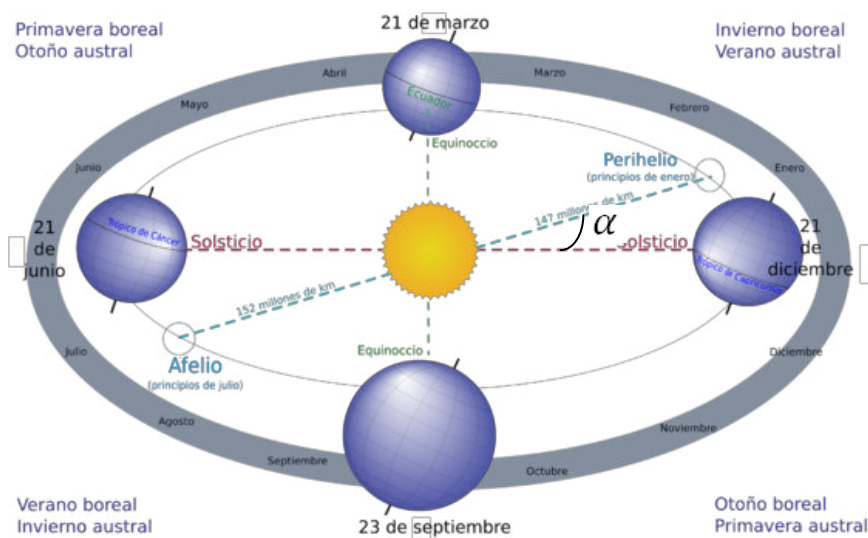


Figura A.2. Posición de la Tierra respecto al Sol.

A.2. Reflectancia (ρ)

La reflectancia es la razón entre la radiación reflejada y la incidente, se consideran dos tipos de reflectancia de interés cuando se habla de correcciones atmosféricas, la reflectancia de la cima de la atmosfera (TOA), también llamada reflectancia planetaria (ρ_p) y la reflectancia al nivel de la superficie (ρ_c) (Rahman et al., 1994). La reflectancia planetaria es la razón de la radiación solar reflejada por el sistema tierra-Atmosfera a la radiación solar incidente. Considere la geometría de la Figura A.3. Se asume que una superficie lambertiana elemental d_A , es irradiada por un flujo radiante incidente $E(Wm^{-2})$, y que el flujo radiante reflejado Φ , desde, dA , en cualquier dirección “ θ ” a la normal a la superficie es dado por la ecuación:

$$d^2\Phi = Ld\Omega dA \cos\theta \quad (A.10)$$

donde, L es la radiancia (en $Wm^{-2}sr^{-1}$). El análisis de un campo de la radiación a menudo requiere de la consideración de la cantidad de energía radiante confinada a un elemento de ángulo sólido. El ángulo sólido Ω , es definido como la razón del área total, σ de una superficie esférica al cuadrado del radio de la esfera r , tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad (A.11)$$

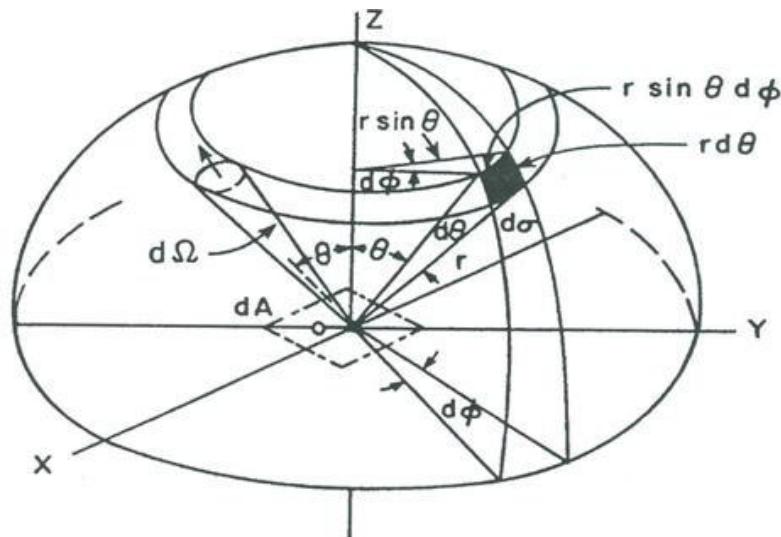


Figura A.3. Reflexión difusa de una superficie lambertiana (Smith et al., 1980)

Las unidades del ángulo sólido Ω , son expresadas en términos del estereorradián (sr). Para una esfera cuya área superficial es $4\pi r^2$, su ángulo sólido es 4π sr. Para obtener un ángulo sólido elemental diferencial, construimos una esfera cuyo punto central es denotado como O. Asumiendo una línea a través del punto O que se mueve en el espacio y que intercepta una superficie arbitraria localizada a una distancia r desde el punto O, entonces, como es evidente en la Figura A.3, el área diferencial $d\sigma$ en coordenadas esféricas es dado por la siguiente ecuación:

$$d\sigma = (r d\theta)(r \sin \theta d\phi) \quad (\text{A.12})$$

donde el ángulo sólido diferencial es:

$$d\Omega = \frac{\sigma}{r^2} = \sin \theta d\theta d\phi \quad (\text{A.13})$$

donde θ y ϕ denotan los ángulos cenital y acimutal, respectivamente, en coordenadas polares. El flujo radiante total reflejada en el hemisferio, $d\Phi_h$ está dado por la siguiente ecuación:

$$d\Phi_h = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L dA \cos\theta \sin\theta d\phi = \pi L dA \quad (\text{A.14})$$

donde el subíndice h, representa el hemisferio total. Luego, la reflectancia difusa ρ de la superficie es:

$$\rho = \frac{d\Phi_h}{d\Phi_i} = \frac{\pi L dA}{E dA} = \pi \frac{L}{E} \quad (\text{A.15})$$

donde la cantidad πL , es la densidad de flujo radiante reflejado desde la superficie, que es equivalente a la excitación radiante M de la fuente auto emisora, o expresado de otra forma, la razón $d\Phi_h/d\Phi_i$ es la excitación radiante de una superficie Lambertiana. Por consiguiente, de la ecuación (A.15):

$$M = \pi L \quad (\text{A.16})$$

En el caso general, la radiancia L , de la superficie es una función del ángulo θ y el ángulo acimutal ϕ , es decir $L(\theta, \phi)$ en donde esta radiancia es la recibida por el sensor. Entonces la ecuación (A.11) se hace.

$$\rho = \frac{d\Phi_h}{d\Phi_i} = \frac{1}{E dA} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) dA \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \rho_p \quad (\text{A.17})$$

donde la ecuación (A.17), no puede ser resuelta hasta que conozcamos la dependencia de la radiancia L , con θ y ϕ . Muchas superficies naturales muestran características lambertianas con $\theta = 40^\circ$, y algunas (tales como la nieve y el desierto) son lambertianas hasta cerca de $\theta = 50^\circ$, o $\theta = 60^\circ$, .Sin embargo, aún bajo la geometría más restringida de observaciones del satélite Landsat, la aproximación a condiciones lambertianas no siempre es posible (Smith et al., 1980). Existen muchas superficies que salen significativamente del caso Lambertiano para θ superior a unos

60°. Muchas superficies naturales muestran poco cambio en la radiancia con el acimut ϕ . En la ecuación (A.17), E es la irradiancia Extraterrestre Solar. Este tipo de variación no se tiene en cuenta a efectos de la constante solar. Sin embargo, la oscilación de la distancia Sol – Tierra, a lo largo del año, produce la consiguiente alteración en el valor de la constante solar. De esta forma, la radiación que llega al exterior de la atmosfera es (Slater, 1980):

$$E = E_0 \varepsilon_0 \quad (\text{A.18})$$

donde ε_0 , es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita de la Tierra y viene dado por la ecuación A.15.

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = \frac{1}{d^2} \quad (\text{A.19})$$

La radiación solar que llega al exterior de la atmosfera sobre una superficie plana, en función de la altura del Sol α , será por lo tanto

$$E = \varepsilon_0 E_0 \text{Sen} \alpha = \varepsilon_0 E_0 \text{Cos} \theta \quad (\text{A.20})$$

Luego, la reflectancia planetaria ρ_p , es dada por la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{2\pi} L(\theta, \phi) \text{Cos} \theta \text{Sen} \theta d\theta d\phi}{\varepsilon_0 E_0 \text{Cos} \theta} \quad (\text{A.21})$$

En general, la dependencia de $L(\theta, \phi)$, con θ y ϕ es muy poco conocido, y por consiguiente, en la ausencia de modelos angulares teóricos satisfactorios, se asume la isotropía, es decir, $L(\theta, \phi) = L$ y por tanto se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{\pi L d^2}{E_0 \text{Cos} \theta} \quad (\text{A.22})$$

A.3. Características radiativas de la materia

Cuando un flujo de energía radiante, Φ_i , alcanza la superficie de cualquier objeto, una parte de esta radiación es reflejada y, por tanto, es devuelta al medio del que procede, originando así un flujo reflejado, Φ_r . Otra parte es absorbida por el propio objeto, constituyendo un flujo Φ_a . Por último, una fracción del flujo incidente será transmitida Φ_t , normalmente en otras formas de energía (Pérez et al., 2006). La Figura A.4, muestra un esquema de la transformación que sufre el flujo incidente al interaccionar con la superficie.

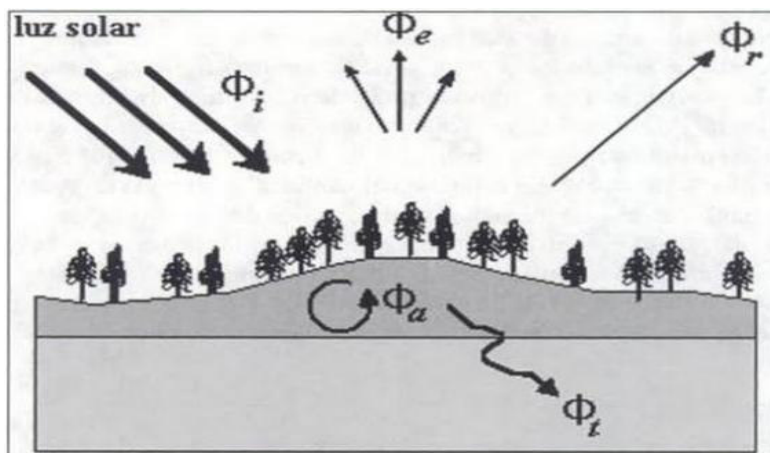


Figura A.4. Transformación del flujo incidente (Pérez et al., 2006).

De este modo, la radiación que recibe la superficie puede descomponerse en tres términos:

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_a + \Phi_t \quad (\text{A. 23})$$

Sin embargo, es habitual expresar la anterior ecuación en unidades relativas, para ello se divide por el flujo incidente, de forma que se llega a la relación:

$$I = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} + \frac{\Phi_a}{\Phi_i} + \frac{\Phi_t}{\Phi_i} = \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{A. 24})$$

En la expresión ρ, α y τ se conocen como *reflectividad*, *absortividad* y *transmisividad*, respectivamente. El interés en la interacción solar con las superficies naturales está orientado al análisis de los datos que capta un sensor exterior a ellas, que opera habitualmente en el intervalo espectral de 0,3 a 3 μm .

ANEXO B

B.1. Distancia Tierra - Sol

Tabla B.1. Distancia Tierra – Sol (d), en unidades astronómicas, para cada día del año (Chander et al., 2009).

Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)	Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)	Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)	Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)	Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)	Día del año	Distancia Tierra-Sol (d)
1	0.98331	61	0.99108	121	1.00756	181	1.01665	241	1.00992	301	0.99359
2	0.9833	62	0.99133	122	1.00781	182	1.01667	242	1.00969	302	0.99332
3	0.9833	63	0.99158	123	1.00806	183	1.01668	243	1.00946	303	0.99306
4	0.9833	64	0.99183	124	1.00831	184	1.0167	244	1.00922	304	0.99279
5	0.9833	65	0.99208	125	1.00856	185	1.0167	245	1.00898	305	0.99253
6	0.98332	66	0.99234	126	1.0088	186	1.0167	246	1.00874	306	0.99228
7	0.98333	67	0.9926	127	1.00904	187	1.0167	247	1.0085	307	0.99202
8	0.98335	68	0.99286	128	1.00928	188	1.01669	248	1.00825	308	0.99177
9	0.98338	69	0.99312	129	1.00952	189	1.01668	249	1.008	309	0.99152
10	0.98341	70	0.99339	130	1.00975	190	1.01666	250	1.00775	310	0.99127
11	0.98345	71	0.99365	131	1.00998	191	1.01664	251	1.0075	311	0.99102
12	0.98349	72	0.99392	132	1.0102	192	1.01661	252	1.00724	312	0.99078
13	0.98354	73	0.99419	133	1.01043	193	1.01658	253	1.00698	313	0.99054
14	0.98359	74	0.99446	134	1.01065	194	1.01655	254	1.00672	314	0.9903
15	0.98365	75	0.99474	135	1.01087	195	1.0165	255	1.00646	315	0.99007
16	0.98371	76	0.99501	136	1.01108	196	1.01646	256	1.0062	316	0.98983
17	0.98378	77	0.99529	137	1.01129	197	1.01641	257	1.00593	317	0.98961
18	0.98385	78	0.99556	138	1.0115	198	1.01635	258	1.00566	318	0.98938
19	0.98393	79	0.99584	139	1.0117	199	1.01629	259	1.00539	319	0.98916
20	0.98401	80	0.99612	140	1.01191	200	1.01623	260	1.00512	320	0.98894
21	0.9841	81	0.9964	141	1.0121	201	1.01616	261	1.00485	321	0.98872

22	0.98419	82	0.99669	142	1.0123	202	1.01609	262	1.00457	322	0.98851
23	0.98428	83	0.99697	143	1.01249	203	1.01601	263	1.0043	323	0.9883
24	0.98439	84	0.99725	144	1.01267	204	1.01592	264	1.00402	324	0.98809
25	0.98449	85	0.99754	145	1.01286	205	1.01584	265	1.00374	325	0.98789
26	0.9846	86	0.99782	146	1.01304	206	1.01575	266	1.00346	326	0.98769
27	0.98472	87	0.99811	147	1.01321	207	1.01565	267	1.00318	327	0.9875
28	0.98484	88	0.9984	148	1.01338	208	1.01555	268	1.0029	328	0.98731
29	0.98496	89	0.99868	149	1.01355	209	1.01544	269	1.00262	329	0.98712
30	0.98509	90	0.99897	150	1.01371	210	1.01533	270	1.00234	330	0.98694
31	0.98523	91	0.99926	151	1.01387	211	1.01522	271	1.00205	331	0.98676
32	0.98536	92	0.99954	152	1.01403	212	1.0151	272	1.00177	332	0.98658
33	0.98551	93	0.99983	153	1.01418	213	1.01497	273	1.00148	333	0.98641
34	0.98565	94	1.00012	154	1.01433	214	1.01485	274	1.00119	334	0.98624
35	0.9858	95	1.00041	155	1.01447	215	1.01471	275	1.00091	335	0.98608
36	0.98596	96	1.00069	156	1.01461	216	1.01458	276	1.00062	336	0.98592
37	0.98612	97	1.00098	157	1.01475	217	1.01444	277	1.00033	337	0.98577
38	0.98628	98	1.00127	158	1.01488	218	1.01429	278	1.00005	338	0.98562
39	0.98645	99	1.00155	159	1.015	219	1.01414	279	0.99976	339	0.98547
40	0.98662	100	1.00184	160	1.01513	220	1.01399	280	0.99947	340	0.98533
41	0.9868	101	1.00212	161	1.01524	221	1.01383	281	0.99918	341	0.98519
42	0.98698	102	1.0024	162	1.01536	222	1.01367	282	0.9989	342	0.98506
43	0.98717	103	1.00269	163	1.01547	223	1.01351	283	0.99861	343	0.98493
44	0.98735	104	1.00297	164	1.01557	224	1.01334	284	0.99832	344	0.98481
45	0.98755	105	1.00325	165	1.01567	225	1.01317	285	0.99804	345	0.98469
46	0.98774	106	1.00353	166	1.01577	226	1.01299	286	0.99775	346	0.98457
47	0.98794	107	1.00381	167	1.01586	227	1.01281	287	0.99747	347	0.98446
48	0.98814	108	1.00409	168	1.01595	228	1.01263	288	0.99718	348	0.98436
49	0.98835	109	1.00437	169	1.01603	229	1.01244	289	0.9969	349	0.98426
50	0.98856	110	1.00464	170	1.0161	230	1.01225	290	0.99662	350	0.98416

51	0.98877	111	1.00492	171	1.01618	231	1.01205	291	0.99634	351	0.98407
52	0.98899	112	1.00519	172	1.01625	232	1.01186	292	0.99605	352	0.98399
53	0.98921	113	1.00546	173	1.01631	233	1.01165	293	0.99577	353	0.98391
54	0.98944	114	1.00573	174	1.01637	234	1.01145	294	0.9955	354	0.98383
55	0.98966	115	1.006	175	1.01642	235	1.01124	295	0.99522	355	0.98376
56	0.98989	116	1.00626	176	1.01647	236	1.01103	296	0.99494	356	0.9837
57	0.99012	117	1.00653	177	1.01652	237	1.01081	297	0.99467	357	0.98363
58	0.99036	118	1.00679	178	1.01656	238	1.0106	298	0.9944	358	0.98358
59	0.9906	119	1.00705	179	1.01659	239	1.01037	299	0.99412	359	0.98353
60	0.99084	120	1.00731	180	1.01662	240	1.01015	300	0.99385	360	0.98348
										361	0.98344
										362	0.9834
										363	0.98337
										364	0.98335
										365	0.98333
										366	0.98331

ANEXO C

C.1. Características técnicas de los satélites Terra y Landsat.

Los satélites constituyen un objeto artificial situado en el espacio que gira alrededor de la Tierra siguiendo una órbita específica. Son las plataformas más adecuadas para obtener una visión de regiones de gran extensión y, a diferencia de los cohetes, pueden permanecer mucho tiempo en órbita, permitiendo una visión constante de la Tierra (Sobrino, 2000).

Tabla C.1. Características generales del satélite Terra (Abrams et al., 1998).

Misión	Earth Observing System (EOS)
Lanzamiento	18/12/1999
Situación Actual	Activo
Órbita	Polar y helio-síncrona
Altitud	705 km.
Inclinación	98,2°
Horario de Paso	10:30 a.m.
Tiempo de Duración de la orbita	98,1 min.
Período de Revisita	16 días
Sensores	ASTER, <u>MODIS</u> , MISR, CERES y MOPITT

Tabla C.2. Información general sobre la serie de satélites Landsat 5, 7 y 8 (USGS, 2016a).

Satélite	Sensores	Fecha de lanzamiento/Fuera de servicio	Altitud (km)	Inclinación (grados)	Periodo (min)	Ciclo de repetición (Días)	cruce ecuatorial (a.m.)
Landsat 5	TM	1/03/1984 – 05/06/2013	705	98.2	98.2	16	09:45
Landsat 7	ETM+	15/04/1999 – En operación	705	98.2	98.2	16	10:00
Landsat 8	OLI / TIRS	11/02/2013 – En operación	705	98.2	98.2	16	10:00

C.2. Características técnicas de los sensores TM, ETM+, OLI y MODIS.

Los sistemas o dispositivos de sensores remotos pueden recibir radiación electromagnética proveniente de la superficie de la Tierra en cualquier rango de longitudes de onda. Sin embargo, por razones técnicas y atmosféricas, los intervalos de longitudes de onda más utilizados, para usos de recursos naturales, son de 0,4 μm a 0,13 μm (Pérez, 2007).

Tabla C.3. Características del sensor TM (USGS, 2016a).

Modo espectral	Banda	Resolución espectral [μm]	Resolución Espacial [m]	Resolución Radiométrica [bits]	Resolución Temporal [Días]
Multiespectral	Banda 1: azul	0.45 – 0.52	30	8	16
	Banda 2: verde	0.52 – 0.60			
	Banda 3: roja	0.63 – 0.69			
	Banda 4: Infrarrojo cercano 1	0.76 – 0.90			
	Banda 5: Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75			
	Banda 7: Infrarrojo medio	2.08 – 2.35			
Termal	Banda 6: Infrarrojo térmico	10.40 – 12.50	120		

Tabla C.4. Características del sensor ETM+ (USGS, 2016a).

Modo espectral	Banda	Resolución espectral [μm]	Resolución Espacial [m]	Resolución Radiométrica [bits]	Resolución Temporal [Días]
Multiespectral	Banda 1: azul	0.45 – 0.52	30	8	16
	Banda 2: verde	0.53 – 0.61			
	Banda 3: roja	0.63 – 0.69			
	Banda 4: Infrarrojo cercano 1	0.78 – 0.90			
	Banda 5: Infrarrojo cercano 2	1.55 – 1.75			
	Banda 7: Infrarrojo medio	2.09 – 2.35			
Pancromática	Banda 8: Pancromática	0.52 – 0.90	15		

Tabla C.5. Características del sensor OLI (USGS, 2016a).

Modo espectral	Banda	Resolución espectral [μm]	Resolución Espacial [m]	Resolución Radiométrica [bits]	Resolución Temporal [Días]
Multiespectral	Banda 1: Aerosol costero	0.43 – 0.45	30	12	16
	Banda 2: azul	0.45 – 0.51			
	Banda 3: verde	0.53 – 0.59			
	Banda 4: roja	0.64 – 0.67			
	Banda 5: Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 – 0.88			
	Banda 6: SWIR 1	1.57 – 1.65			
	Banda 7: SWIR 2	2.11 – 2.29			
	Banda 9: Cirrus	1.36 – 1.38			
Pancromática	Banda 8: Pancromático	0.50 – 0.68	15		

Para el caso del sensor MODIS, este cuenta con una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 bandas espectrales distribuidas en un rango de longitud de onda que va de los 0.4 μm a los 14.4 μm. Las bandas de la 1 a la 7 son útiles para las aplicaciones terrestres; las bandas 8 a 16 para las observaciones oceánicas y las bandas 17 a 19 para las mediciones atmosféricas. Las bandas 20 a la 36, cubren la región del infrarrojo térmico (MODIS, 2016). Dos bandas son tomadas a una resolución espacial de 250 m x 250 m en el nadir, cinco bandas a 500 m x 500 m y las 29 bandas restantes a 1 km x 1 km. Las características de las bandas espectrales del sensor MODIS, se muestran a continuación:

Tabla C.6. Características de las bandas espectrales del sensor MODIS (MODIS, 2016).

Uso principal	Banda	Ancho de banda [μm]	Radiancia espectral [$\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m sr})$]	SNR o NE (delta) T requerido T(K)
Límite de Tierra/ Nubes/ aerosoles	1	620 - 670	21.80	128
	2	841 - 876	24.70	201
Propiedades de Tierra/ Nubes/ aerosoles	3	459 - 479	35.30	243
	4	545 - 565	29.00	228
	5	1230 - 1250	5.40	74
	6	1628 - 1652	7.30	275
	7	2105 - 2155	1.00	110
Color del océano/ fitoplancton/ biogeoquímica	8	405 - 420	44.90	880
	9	438 - 448	41.90	838
	10	483 - 493	32.10	802
	11	526 - 536	27.90	754
	12	546 - 556	21.00	750
	13	662 - 672	9.50	910
	14	673 - 683	8.70	1087
	15	743 - 753	10.20	586
Vapor de agua atmosférico	16	862 - 877	6.20	516
	17	890 - 920	10.00	167
	18	931 - 941	3.60	57
Tem. Sup./ nubes	19	915 - 965	15.00	250
	20	3.660 - 3.840	0.45 (300 K)	0.05
Temperatura atmosférica	21	3.929 - 3.989	2.38 (335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67 (300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79 (300K)	0.07
	24	4.433 - 4.498	0.17 (250K)	0.25
Vapor de agua de nubes Cirrus	25	4.482 - 4.549	0.59 (275K)	0.25
	26	1.360 - 1.390	6.00	150
Propiedades de las nubes	27	6.535 - 6.895	1.16 (240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18 (250K)	0.25
	29	8.400 - 8.700	9.58 (300K)	0.05
Ozono	30	9.580 - 9.880	3.69 (250K)	0.25
Temperatura de la superficie/ nubes	31	10.780 - 11.280	9.55 (300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94 (300K)	0.05
Altitud de las nubes	33	13.185 - 13.485	4.52 (260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76 (250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11 (240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08 (220K)	0.35

C.3. Características generales del sensor Aster, aplicado a la generación de modelos digitales de elevación (DEM).

El sensor ASTER, es un sistema de observación especial que posee la capacidad de capturar imágenes estereoscópicas de una misma porción de terreno, por lo que permite la extracción de modelos de elevación digital (DEM, por sus siglas en ingles) (Oñate et al., 2007). El DEM, muestra el relieve de la tierra en formato digital en intervalos horizontales regularmente espaciados, y es requisito previo para las correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas de instrumentos ópticos (Toutin, 2008).

Las imágenes ASTER capturan información en 15 bandas del espectro electromagnético: cuatro en el espectro visible y el infrarrojo cercano (VNIR: 0.5 – 1.0 μm) con 15 m x 15 m de resolución espacial, seis en el infrarrojo de onda corta (SWIR: 1.0 – 2.5 μm) con 30 m x 30 m de resolución espacial y cinco en el infrarrojo térmico (TIR: 8 – 12 μm) con una resolución espacial de 90 m (Fujisada, 2005).

El subsistema de VNIR tiene 2 telescopios uno en el nadir y uno con vista atrás con un ángulo de 27.60° que proporcionan una vista en el nadir (nadir –looking) (banda 3N: 0.76–0.86 μm) y una vista hacia atrás (backward-looking) (banda 3B: 27.7° del nadir) que permiten obtener una visión estereoscópica de una región determinada en la dirección de vuelo del satélite (Figura C.1). La diferencia temporal entre las dos observaciones es de 55 segundos, por lo que las variaciones en las condiciones ópticas y atmosféricas son mínimas, consecuentemente se puede esperar una excelente correlación entre las imágenes. La distancia entre órbitas vecinas es de

172 km en el ecuador. El sistema de observación orbital ASTER posee una órbita circular heliosincrónica polar con una altitud de 705 Km, cruza la línea ecuatorial a las 10:30 AM y regresa al mismo punto cada 16 días (Oñate et al., 2007).

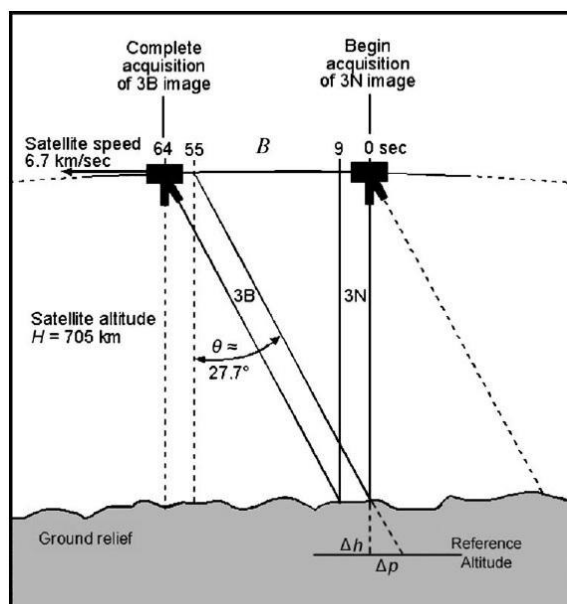


Figura C.1. Geometría del sistema Along-Track del sensor ASTER (Oñate et al., 2007).

Una imagen ASTER Level 1A, contiene los datos de la imagen sin aplicarle coeficientes de calibración radiométrica y remuestreo geométrico; al aplicarse dichos coeficientes, se obtiene una imagen Level 1B. Las imágenes Level 1A y Level 1B pueden ser utilizadas para la generación de DEMs, pues los parámetros geométricos útiles del instrumento y la información del satélite son incluidos en ellas (Oñate et al., 2007).

ANEXO D

D.1. Datos imágenes utilizados.

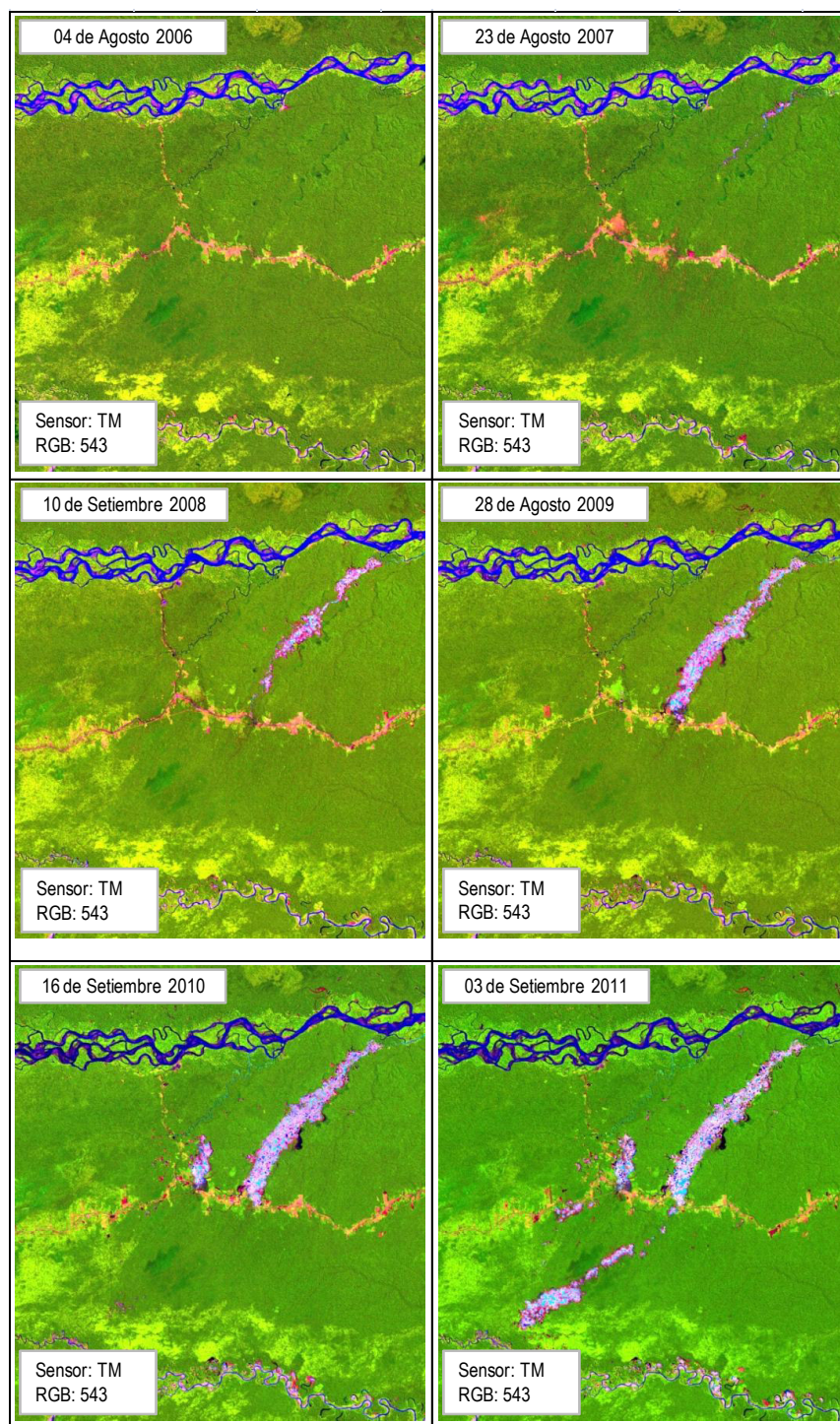


Figura D.1. Imágenes del sensor TM. Las imágenes corresponden a la Quebrada Guacamayo. Posición central de las escenas: $-12^{\circ}53'10.60''S$ y $-70^{\circ}0'36.48''O$.

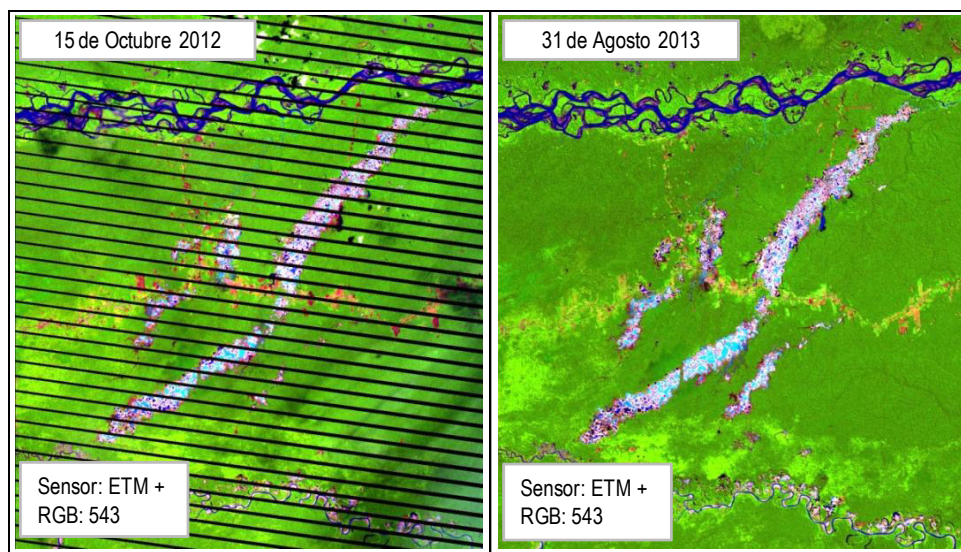


Figura D.2. Imágenes del sensor ETM+, utilizados en este trabajo de tesis. Las imágenes corresponden a la Quebrada Guacamayo. Posición central de las escenas: $-12^{\circ}53'10.60''S$ y $-70^{\circ}0'36.48''O$.

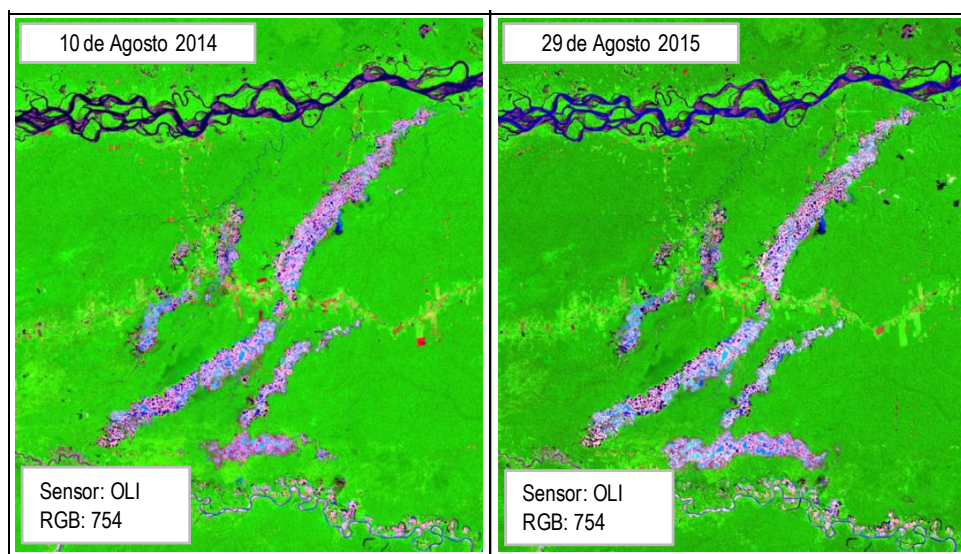


Figura D.3. Imágenes del sensor OLI, utilizados en este trabajo de tesis. Las imágenes corresponden a la Quebrada Guacamayo. Posición central de las escenas: $-12^{\circ}53'10.60''S$ y $-70^{\circ}0'36.48''O$.

ANEXO E

E.1. precio mensual del oro (\$US/kg).

Tabla E.1. Se muestra los datos de precio mensual del oro (\$US/kg) para el periodo 2006 al 2015.

Fecha	P. del oro (\$US/kg)	Fecha	P. del oro (\$US/kg)	Fecha	P. del oro (\$US/kg)	Fecha	P. del oro (\$US/kg)	Fecha	P. del oro (\$US/kg)
31/12/2015	35951.61	11/12/2013	39514.78	22/12/2011	53596.3	02/12/2009	35286.23	13/12/2007	28803.99
01/12/2015	34143.45	11/11/2013	40553.42	22/11/2011	51854.39	02/11/2009	38473.89	13/11/2007	26099.62
01/11/2015	34219	12/10/2013	41395.37	23/10/2011	53971.33	03/10/2009	33529.2	14/10/2007	25445.55
02/10/2015	36717.92	12/09/2013	40941.47	23/09/2011	52788.37	03/09/2009	32242.11	14/09/2007	24123.91
02/09/2015	35810.9	13/08/2013	43893.32	24/08/2011	56012.51	04/08/2009	31402.81	15/08/2007	22724.78
03/08/2015	36618.82	14/07/2013	42868.36	25/07/2011	59082.89	05/07/2009	30745.14	16/07/2007	21542.09
04/07/2015	35153.47	14/06/2013	41363.11	25/06/2011	51971.26	05/06/2009	29987.75	16/06/2007	21455.18
04/06/2015	37571.68	15/05/2013	44562.74	26/05/2011	48289.3	06/05/2009	31451.08	17/05/2007	21084.93
05/05/2015	38122.59	15/04/2013	45988.29	26/04/2011	49077.12	06/04/2009	28859.08	17/04/2007	21298.72
05/04/2015	38212.53	16/03/2013	47914.03	27/03/2011	48443.89	07/03/2009	28699.04	18/03/2007	22205.52
06/03/2015	38665.13	14/02/2013	51191.48	25/02/2011	45975.46	05/02/2009	30204.04	16/02/2007	21028.07
04/02/2015	38590.14	15/01/2013	52834.7	26/01/2011	45130.71	06/01/2009	29116.97	17/01/2007	21498.71
05/01/2015	40562.99	16/12/2012	53646.23	27/12/2010	42836.6	07/12/2008	27554.23	18/12/2006	20077.35
06/12/2014	38050.41	16/11/2012	54528.65	27/11/2010	44187.81	07/11/2008	24313.52	18/11/2006	19801.19
06/11/2014	38333.34	17/10/2012	55167.91	28/10/2010	43857.42	08/10/2008	23551.88	19/10/2006	19990.87
07/10/2014	36767.43	17/09/2012	56255.9	28/09/2010	42687.01	08/09/2008	28582.77	19/09/2006	19041.14
07/09/2014	38795.66	18/08/2012	57059.16	29/08/2010	41577.02	09/08/2008	26131.95	20/08/2006	18899.88
08/08/2014	40796.78	19/07/2012	51952.63	30/07/2010	39812.63	10/07/2008	27538.81	21/07/2006	19710
09/07/2014	42158.95	19/06/2012	50608.09	30/06/2010	37555.35	10/06/2008	29861.74	21/06/2006	20171.41
09/06/2014	42380.99	20/05/2012	52350.38	31/05/2010	39901.72	11/05/2008	28729.24	22/05/2006	18600.68
10/05/2014	40323.59	20/04/2012	51205.63	01/05/2010	38933.61	11/04/2008	28455.97	22/04/2006	21143.95
10/04/2014	41436.2	21/03/2012	52789.66	01/04/2010	37920.93	12/03/2008	29849.47	23/03/2006	20374.46
11/03/2014	42156.23	20/02/2012	53052.48	02/03/2010	35787.26	11/02/2008	31270.56	21/02/2006	17711.23
09/02/2014	43099.54	21/01/2012	55733.18	31/01/2010	35956.68	12/01/2008	29594.22	22/01/2006	17876.4
10/01/2014	40743.03			01/01/2010	34770.23				

ANEXO F

F.1. Resultados obtenidos de la acumulación e incremento anual de las áreas deforestadas por minería aurífera aluvial.

Tabla F.1. Se muestra los datos de la acumulación anual de las áreas deforestadas por minería aurífera, para el periodo 2007 al 2015.

Tiempo (año)	Minería aurífera (ha)
2007	248.85
2008	1025.82
2009	2052.45
2010	3136.23
2011	4882.68
2012	6516.27
2013	7582.23
2014	8681.13
2015	9797.94

Tabla F.2. Se muestra los datos del incremento anual de las áreas deforestadas por minería aurífera, para el periodo 2007 al 2015.

Tiempo (año)	Incremento de la Deforestación (ha)
2007	248.85
2008	776.97
2009	1026.63
2010	1083.78
2011	1746.45
2012	1633.59
2013	1065.96
2014	1098.9
2015	1116.81